

POLITECNICO DI MILANO
Facoltà di Ingegneria civile
Orientamento infrastrutture di Trasporto



**PAVIMENTAZIONI STRADALI: INDAGINE SULLE
TECNOLOGIE DI RICICLAGGIO A FREDDO E SUI
CONGLOMERATI BITUMINOSI TIEPIDI**

Relatore: Prof. Maurizio CRISPINO

Correlatore: Ing. Claudio BROVELLI

Tesi di Laurea di:

Simone VALAGUSSA Matr. n. 724608

Anno accademico 2009/2010

Indice

Tecniche di riciclaggio a freddo delle pavimentazioni stradali	7
Introduzione	7
Il riciclaggio delle pavimentazioni	8
Situazione Europea	10
La storia in Italia	12

Capitolo 1

Pavimentazioni stradali	13
1.1 Generalità	13
1.2 I componenti della pavimentazione	14
1.2.1 Manto d'usura	16
1.2.2 Struttura della pavimentazione	18
1.2.3 Sottofondo	18

Capitolo 2

Tecniche di riciclaggio delle pavimentazioni stradali	19
2.1 Definizioni	19
2.2 La filosofia del riciclaggio	22
2.3 Metodi di riciclaggio	23
2.3.1 Riciclaggio in impianto fisso	24
2.3.1.1 Riciclaggio in impianto fisso a caldo	24
2.3.1.2 Riciclaggio in impianto fisso a freddo	25
2.3.2 Riciclaggio in-sito	25
2.3.2.1 Riciclaggio in-sito a caldo	25
2.3.2.2 Riciclaggio superficiale in-sito a caldo-Termorigenerazione	26
2.3.2.3 Riciclaggio in-sito a basse temperature (tiepido e semi-tiepido)	27
2.3.2.4 Riciclaggio in-sito a freddo	27
2.4 Scelta della soluzione d'intervento	28

Capitolo 3

Tecniche di riciclaggio a freddo	29
Generalità	29
3.1 Il processo di riciclaggio a freddo	30
3.1.1 Riciclaggio in impianto fisso	31
3.1.2 Riciclaggio in sito	31
3.2 Applicazioni possibili del riciclaggio a freddo	34
3.2.1 Riciclaggio di RAP al 100%	35
3.2.2 Stabilizzazione di materiale granulare/RAP	37
3.3 Applicazioni senza leganti	38
3.3.1 Polverizzazione	38
3.3.2 Rilavorazione	39
3.3.3 Stabilizzazione meccanica	39

Capitolo 4

Procedure di mix design	41
Generalità	41
4.1 Procedura del Ministero dei Lavori Pubblici	43
4.1.1 Campionamento e preparazione di campioni rappresentativi	43
4.1.1.1 Campionamento	43
4.1.1.2 Proporzionamento	43
4.1.2 Procedura di mix design	45
4.1.2.1 Determinazione della fase fluida ottima (OFC)	45
4.1.2.2 Determinazione del contenuto ottimo di emulsione (OEC) e cemento	45
4.1.3 Specifiche materiali	46
4.1.3.1 Legante	46
4.1.3.2 Conglomerato riciclato	47
4.1.3.3 Inerti di integrazione	48
4.1.3.4 Cemento	49
4.1.3.5 Acqua	49
4.2 Procedura Wirtgen	49
4.2.1 Campionamento e preparazione dei campioni	50
4.2.1.1 Campionamento in sito	50

4.2.1.2 Preparazione dei campioni per la procedura di mix design	50
4.2.1.2.1 Prove geognostiche standard	50
4.2.1.2.2 Miscelazione dei campioni	50
4.2.1.2.3 Proporzionamento rappresentativo	50
4.2.1.2.4 Umidità igroscopica	51
4.2.2 Procedura di mix design	51
4.2.2.1 Requisiti del filler attivo	51
4.2.2.2 Determinazione del contenuto ottimale di liquido (Fopt) e della densità massima del secco ($y_{s,max}$) del materiale trattato	52
4.2.2.3 Determinazione del contenuto ottimale di emulsione bituminosa (OEC)	52
4.3 Procedura Marshall-modificata	53
4.3.1 Determinazione del contenuto ottimo di emulsione bituminosa (OEC)	54
4.3.2 Determinazione del contenuto ottimo di acqua (OWC)	55
4.4 Procedura Superpave (Università di Rhode Island)	55
4.4.1 Studio pilota	56
4.4.2 Programma sperimentale	57
4.4.3 Procedura di mix design	59
4.4.3.1 Preparazione del RAP	59
4.4.3.2 Temperatura di realizzazione miscela e di compattazione	60
4.4.3.3 Preparazione della miscela	60
4.4.3.4 Compattazione dei provini	61
4.4.3.5 Determinazione della densità	61
4.4.3.6 Determinazione del contenuto ottimo di emulsione (OEC)	62
4.4.3.7 Determinazione del contenuto ottimo di acqua (OWC)	62
4.4.3.8 Determinazione della sensibilità all'acqua	62

Capitolo 5

Leganti e loro impiego	63
5.1 Tipi di leganti	63
5.1.1 Generalità	63
5.1.2 Leganti cementizi	65
5.1.3 Leganti bituminosi	66
5.2 Stabilizzazione con bitume	69

5.2.1 Le emulsioni bituminose	69
5.2.1.1 Componenti	70
5.2.1.1.1 Bitume	70
5.2.1.1.2 Acqua	70
5.2.1.1.3 Fluidificanti (o flussanti)	71
5.2.1.1.4 Emulsionanti (o tensioattivi)	71
5.2.1.2 Classificazione delle emulsioni bituminose	72
5.2.1.2.1 Classificazione secondo il carattere ionico	72
5.2.1.2.2 Classificazione secondo la percentuale di bitume residuo	72
5.2.1.2.3 Classificazione secondo la velocità di rottura	72
5.2.1.3 Proprietà delle emulsioni bituminose	74
5.2.1.3.1 Viscosità	74
5.2.1.3.2 Stabilità allo stoccaggio	75
5.2.1.3.3 Velocità di rottura	75
5.2.1.3.4 Adesione	76
5.2.1.3.5 Fattori di influenza sulle proprietà delle emulsioni bituminose	77
5.2.1.4 Fabbricazione delle emulsioni bituminose	78
5.2.1.5 Le emulsioni bituminose anioniche	80
5.2.1.6 Le emulsioni bituminose cationiche	81
5.2.1.7 Stoccaggio delle emulsioni bituminose	82
5.2.1.8 Stabilizzazione con emulsione bituminosa	83
5.2.1.8.1 Impiego di emulsioni bituminose	83
5.2.1.8.2 Studio delle miscele	83
5.2.1.8.3 Formulazione	83
5.2.1.8.4 Movimentazione	84
5.2.1.8.5 Contenuto totale di liquido	84
5.2.1.8.6 Tempo di costipamento	85
5.2.1.8.7 Controllo di qualità	85
5.2.1.8.8 Maturazione	85
5.2.1.8.9 Concetto di contenuto totale di liquido	86
5.2.1.8.10 Proprietà tipiche dei materiali stabilizzati con emulsioni bituminose	87
5.2.1.8.11 Resistenza e rigidità	88
5.2.1.8.12 Tempo di lavorazione	88

5.2.1.8.13 Densità	89
5.2.2 Stabilizzazione con bitume schiumato	89
5.2.2.1 Generalità	89
5.2.2.2 Caratteristiche del bitume schiumato	91
5.2.2.3 Fattori influenzanti le proprietà schiumogene	92
5.2.2.4 Proprietà schiumogene accettabili	94
5.2.2.5 Dispersione del bitume schiumato	95
5.2.2.6 Idoneità del materiale al trattamento con bitume schiumato	96
5.2.2.7 Campioni di materiale usati per lo studio delle miscele	98
5.2.2.8 Impiego del bitume schiumato	98
5.2.2.9 Aspetti della sicurezza	98
5.2.2.10 Temperatura del materiale	99
5.2.2.11 Costanza delle forniture di bitume	100
5.2.2.12 Flusso di bitume	100
5.2.2.13 Pressione del bitume	101
5.2.2.14 Aggiunta di un filler attivo	101
5.2.2.15 Rilavorazione dello strato finito	102
5.2.2.16 Proprietà tipiche dei materiali stabilizzati con bitume schiumato	102
5.2.2.17 Resistenza	103
5.2.2.18 Rigidezza	104
5.2.2.19 Tempo di lavorazione	105
5.2.2.20 Densità	105

Capitolo 6

Macchinari utilizzati	106
6.1 Macchine gommate: WR 2000 e WR 2500 S	106
6.2 Macchine cingolate: 2200 CR e WR 4200	108
6.3 Impianto mescolatore in-plant	110
6.4 Attrezzature supplementari	112

Capitolo 7

Conclusioni	114
7.1 Vantaggi del riciclaggio a freddo	114

7.2 Idoneità del processo di riciclaggio a freddo	115
7.3 Procedure di mix design	117
7.4 Prospetto riepilogativo: confronto fra cemento e leganti bituminosi	118
Conglomerati bituminosi tiepidi	119
Premessa	119
Introduzione	121
	Capitolo 1
Tipologie di processo	124
Generalità	124
	Capitolo 2
Descrizione delle tecniche WMA	129
2.1 Additivazione con fluidificanti del bitume	129
2.2 Formazione di schiuma di bitume	134
2.2.1 Schiuma di Emulsione Modificata	134
2.2.2. Bitume Schiumato ed Aggregati Riscaldati	137
2.2.3. Sistema a due Componenti di Legante	139
2.2.4. Conglomerati Bituminosi a Bassa Energia	141
2.2.5. Additivazione con Zeoliti	145
2.3 Tecnologie Statunitensi	147
	Capitolo 3
Conclusioni	149
Bibliografia	153

Tecniche di riciclaggio a freddo delle pavimentazioni stradali

Introduzione

Nel corso degli ultimi cinquant'anni le infrastrutture, in modo particolare le vie di comunicazione, hanno conosciuto uno sviluppo senza precedenti. In tutto il mondo, infatti, sono state costruite diverse migliaia di chilometri di nuove strade al fine di soddisfare le esigenze dei volumi di traffico in aumento. Molte di esse sono in uso da oltre vent'anni e, avendo raggiunto il limite della loro vita utile, necessitano di crescenti interventi di manutenzione volti a mantenere livelli accettabili di servizio. Inoltre, negli anni, la quantità media di automezzi è aumentata in modo costante in quanto un volume

più elevato di merci, anziché su rotaie viene trasportato su strada visto che questo tipo di trasporto offre una maggiore rapidità e flessibilità. Il derivante incremento del traffico e delle sollecitazioni delle ruote, il maggiore carico per asse e “ l’età avanzata” sono tutti fattori che concorrono al deterioramento delle sedi stradali.

Con l’inizio del nuovo millennio, le reti viarie della maggior parte dei paesi presentano i problemi sopra elencati; da ciò deriva la necessità di destinare una quota maggiore del budget per la rete stradale alla sola manutenzione delle pavimentazioni preesistenti. Ne consegue una minore disponibilità di denaro per l’adozione di provvedimenti di risanamento o per la costruzione di nuove strade. Molti paesi, addirittura, non dispongono di sufficienti fondi per far fronte alle mere esigenze di manutenzione con un conseguente rapido deperimento della rete stradale. Al fine quindi, di ripristinare i livelli di servizio, risulteranno pertanto necessari interventi di risanamento più costosi. La realizzazione di nuove strade o di progetti di miglioramento, spesso, può essere presa in considerazione soltanto se gli introiti della tassa di transito giustificano l’esborso di capitali. Si tratta, insomma, di una spirale in discesa. Questo scenario, alquanto scoraggiante, rappresenta una sfida per gli ingegneri civili. La Banca Mondiale e altri enti hanno messo in evidenza che ogni stato necessita di un solido complesso di servizi pubblici onde garantire la propria salute economica e hanno sottolineato che una rete stradale in buone condizioni costituisce una parte fondamentale di dette infrastrutture. In quei casi in cui i fondi disponibili non siano sufficienti per superare l’attuale crisi, occorrerà individuare un metodo più redditizio di ripristino della sede stradale. Occorre pertanto fare innovazioni nel settore al fine di trovare metodi di costruzione alternativi in grado di aumentare la redditività dei budget già fissati. Il riciclaggio rappresenta una di queste alternative.

Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali quale misura di risanamento è un concetto relativamente nuovo. Fatta eccezione per una serie di documenti tecnici riguardanti specifici argomenti nell’ambito del riciclaggio, non è molto il materiale pubblicato che gli ingegneri civili hanno a disposizione per conoscere nel dettaglio questo settore.

Il riciclaggio delle pavimentazioni

Riciclare su vasta scala i prodotti di scarto provenienti dai vari settori industriali, può essere ritenuto uno degli obiettivi principali del mondo moderno.

Le motivazioni che sostengono la necessità di riciclare sono molteplici e tutte parimenti importanti, come ben sintetizzano le linee generali del documento “Recycling for road improvements” pubblicato dall’OCSE nel 1997:

- riduzione dell’impiego delle materie prime;
- riduzione dei territori da destinare a discarica;
- contenere l’inquinamento del suolo e dell’atmosfera dovuto al trasporto e all’incenerimento dei rifiuti;
- conservazione dell’energia;
- convenienza economica;
- vantaggi tecnici.

Nella stragrande maggioranza dei Paesi europei sono in atto politiche strategiche volte al sostegno delle attività di riciclaggio. Nella seguente tabella, tratta sempre dal report OCSE vengono sintetizzati gli obiettivi in materia di riciclaggio di alcuni Paesi, europei e non.

Australia	Nel lungo termine riutilizzare al 90% i materiali stradali esausti
Austria	Entro il 2000 ridurre del 50% la quantità dei rifiuti
Belgio	A partire dal 1996, riciclare il 70 % degli scarti del settore delle costruzioni
Danimarca	Entro il 2000 riutilizzare il 54% del totale dei rifiuti
Francia	Azzeramento delle discariche entro l’anno 2000
Giappone	Incrementare dal 42 all’ 80% il riutilizzo degli scarti entro il 2000
Olanda	Riutilizzare il 90% degli scarti del settore delle costruzioni
Regno Unito	In 15 anni raddoppiare l’utilizzo dei materiali riciclati

tab.1 Obiettivi in materia di riciclaggio di alcuni paesi

L'Italia non rientra nell'inchiesta OCSE in quanto, oltre a non aver dichiarato i propri obiettivi, il nostro Paese non ha fornito le risposte al questionario tecnico, predisposto e divulgato dal Gruppo di Lavoro autore del documento.

Questo fatto è sicuramente indicativo della situazione di confusione, disorganizzazione e deficit tecnologico in cui versa l'industria del riciclaggio in Italia. Alcune riflessioni su quanto sopra esposto possono essere riassunte nei seguenti punti:

- le attività di riciclaggio sono negativamente influenzate dal continuo incremento dei costi di raccolta e lavorazione dei rifiuti, assolutamente non competitivi nei confronti delle materie vergini,
- la competitività di questa industria viene negativamente influenzata dalla cattiva immagine dei prodotti riciclati, troppo spesso assimilati a prodotti di scarsa qualità.

Situazione Europea

Nel quadro generale del riciclaggio, il settore delle costruzioni stradali offre notevoli possibilità per riutilizzare massicciamente sia i prodotti di scarto delle pavimentazioni stradali (conglomerati bituminosi, conglomerati cementizi, ecc.) sia quelli provenienti da altri settori industriali (ceneri, pneumatici triturati, ecc.).

Con riferimento ai soli conglomerati bituminosi, i risultati del documento OCSE, dai quali manca purtroppo sempre l'Italia, sono sintetizzati nella tabella che segue.

	Austria	Belgio	Danimarca	Finlandia	Francia	Olanda	Svezia	Regno Unito
% c.b..	80	100	90	95	/	100	75	90
Ricicl. c. impianto	diffuso	diffuso	diffuso	diffuso	diffuso	diffuso		diffuso
Ricicl. c. in sito	limitato		diffuso	diffuso	diffuso	diffuso	diffuso	limitato
Ricicl. f. impianto					diffuso		diffuso	limitato
Ricicl. f. in sito	limitato				diffuso		limitato	

tab.2 Percentuali relative ai soli conglomerati bituminosi

Dai dati in tabella si possono quindi trarre le seguenti conclusioni:

- le % di conglomerato bituminoso disponibile per essere riciclato sono ovunque molto alte;
- il riciclaggio a caldo in impianto è ovunque molto diffuso;
- il riciclaggio a caldo in sito è ancora molto diffuso;
- il riciclaggio a freddo in impianto è diffuso solo in Francia e Svezia;
- il riciclaggio a freddo in sito è diffuso solo in Francia;

Quanto detto apre la strada a numerose riflessioni che mettono in evidenza una serie di fattori estremamente importanti:

- l'utilizzo delle tecniche di riciclaggio a caldo, in massima parte ormai obsolete, oltre a non garantire buone prestazioni finali, lascia immutato il forte impatto ambientale connesso all'emissione dei fumi di bitume. Il riciclaggio a caldo è da considerarsi applicabile, nella sua versione più innovativa con termoventilazione, solo nel caso di conglomerati drenanti-fonoassorbenti;
- alcune tecniche di riciclaggio a freddo, in Italia come nel resto d'Europa pur risolvendo il problema dei fumi, non sono ancora del tutto affidabili dal punto di vista delle prestazioni attese.

La storia in Italia

L'inizio del riciclaggio delle pavimentazioni bituminose in Italia parte attorno agli anni '70 dalla introduzione delle tecniche di fresatura delle pavimentazioni superficiali.

La prima tecnica utilizzata fu quella della fresatura a caldo, realizzata con il riscaldamento delle pavimentazioni a mezzo di riscaldatori alimentati a gas che poi aggrediti con pettini riusciva a demolire 5 o 6 cm di strati superficiali fessurati.

Il metodo ebbe un subitaneo successo perché in quegli anni erano state già installate parecchie barriere di sicurezza lungo le strade più transitate.

La fresatura consentiva pertanto il rifacimento senza superare le quote preesistenti ed evitando la necessità di rialzamento delle barriere. I primi lavori realizzati con questa tecnica misero in mostra due grandi problemi:

- la pericolosità latente della fresatura a caldo per la presenza di notevoli contenitori di gas su strada;
- la limitazione dello spessore di intervento, come già detto, solo 5 o 6 cm nei periodi più caldi, quando già le pavimentazioni mostravano fessurazioni per tutto il pacchetto bituminoso e quindi fino a circa 15 cm di profondità.

Da un punto di vista legislativo, invece, la problematica del riciclaggio fa riferimento a quanto di pertinenza nei DL 05/02/1997 n° 22 (Decreto Ronchi) e DM 05/02/1998 n° 72. Il Decreto Ronchi stabilisce i principi generali del recupero dei rifiuti non pericolosi, purché codificati all'interno del CER (Catalogo Europeo Rifiuti). Il conglomerato bituminoso fresato rientra nel CER e può quindi essere recuperato a norma di legge, previa autorizzazione dell'Ente competente (Regione/Provincia Ufficio Rifiuti - Settore Ecologia). Da un punto di vista economico, l'adozione di queste tecniche è particolarmente vantaggiosa, soprattutto nel caso in cui si proceda al riciclaggio in sito dei materiali costituenti le pavimentazioni.

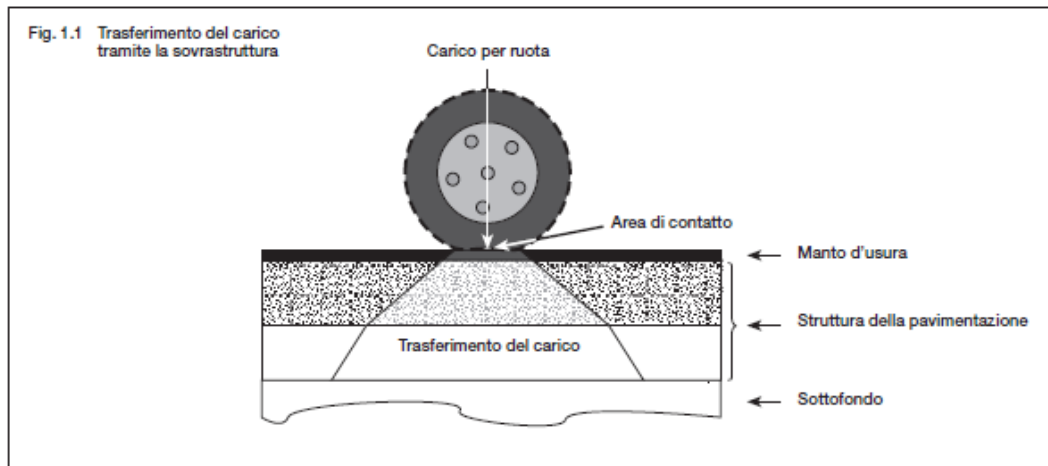
Capitolo 1

Pavimentazioni stradali

1.1 Generalità

La superficie, o manto d'usura, è di solito l'unica parte visibile di una strada. Detto manto riveste la struttura della pavimentazione, costituita da un insieme di strati sovrapposti di materiali diversi, che spesso si estende fino ad una profondità superiore al metro. La struttura (Binder, base) è quella parte della strada che ha il compito di trasferire il carico trasmesso dai veicoli alla "terra", il materiale naturale sottostante (denominato sottofondo). In genere, il sottofondo offre una scarsa portanza; per tale ragione, gli elevati

carichi superficiali indotti dal traffico sono distribuiti su un'ampia area del sottofondo, come si osserva in fig. 1.1



I singoli strati che formano la struttura di una pavimentazione variano nella composizione e nello spessore. Di norma gli spessori dei singoli strati sono compresi fra 125 e 200 mm. Gli strati più vicini alla superficie vengono costruiti in materiali ad alta resistenza (ad es. conglomerato bituminoso a caldo) per tenere conto delle sollecitazioni più elevate. Dato che negli strati inferiori i carichi sono ripartiti su un'area più estesa, le sollecitazioni diminuiscono e possono essere assorbite anche da materiali di qualità più scadente (ad es. ghiaia naturale). In conseguenza di ciò, i materiali costituenti gli strati inferiori sono in genere meno costosi di quelli utilizzati negli strati superiori.

Si distinguono fondamentalmente due tipologie di pavimentazioni:

- le pavimentazioni rigide, nelle quali uno strato legato e stabilizzato viene ricoperto di uno spesso strato di calcestruzzo di notevole resistenza;
- le pavimentazioni flessibili, costruite con materiali naturali e i cui strati superiori sono talvolta legati (normalmente con bitume e/o con l'aggiunta di piccole quantità di cemento) per soddisfare gli elevati requisiti di resistenza.

In linea generale si possono riciclare economicamente in sito soltanto le pavimentazioni flessibili. Le pavimentazioni rigide, costruite in calcestruzzo ad alta resistenza, vengono di solito demolite al termine della loro vita utile.

Una volta ultimata, una strada è sottoposta a forze distruttive originate principalmente da due fonti: gli agenti atmosferici ed il traffico. Entrambi contribuiscono continuamente a ridurre la regolarità superficiale e l'integrità strutturale.

1.2 I componenti della pavimentazione

Come descritto in precedenza, le pavimentazioni stradali sono costituite da tre componenti principali:

- il manto d'usura;
- la struttura (Binder e base);
- il sottofondo;

ognuno di essi ha uno scopo ben specifico e viene quindi esaminato di seguito in modo separato.

1.2.1 Manto d'usura

Il manto d'usura, che costituisce l'interfaccia con il traffico e l'ambiente, serve a proteggere la struttura della pavimentazione da entrambi questi elementi, garantendo durabilità e impermeabilità.

Il traffico incide sul manto d'usura in due modi:

- sollecitazioni trasmesse al manto dai carichi delle ruote giacciono prevalentemente sul piano verticale, mentre la composizione orizzontale riveste importanza nelle curve, nei tratti a forte pendenza e laddove i veicoli frenano. Il materiale impiegato per realizzare il manto d'usura deve possedere caratteristiche di resistenza tali da consentirgli di sopportare tutte le sollecitazioni indotte dal traffico senza rompersi o deformarsi permanentemente;
- l'azione di sfregamento esercitata dai pneumatici, specialmente in curva tende ad abrasare la superficie stradale. Con il passare del tempo, questa azione levigante si riflette in una riduzione dell'aderenza del manto stradale che diventa scivoloso, specialmente se bagnato.

Da parte dell'ambiente il manto d'usura è comunemente esposto a due forme principali di aggressioni:

- le azioni termiche;
- le radiazioni ultraviolette.

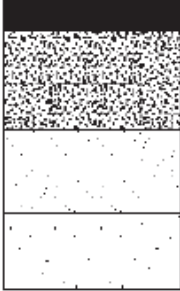
Il manto d'usura, quindi, deve possedere le seguenti proprietà:

- elasticità, per permettere al manto di dilatarsi e contrarsi sotto le continue variazioni termiche;
- resistenza all'irraggiamento solare, per permettere al manto d'usura di assorbire il quotidiano bombardamento dei raggi ultravioletti senza invecchiare precocemente.

Oltre all'aderenza, il manto d'usura deve offrire flessibilità, durabilità ed eccellenti proprietà impermeabilizzanti. Al fine di possedere tali qualità, il manto d'usura viene realizzato in conglomerato bituminoso a caldo, con una percentuale di bitume del 5% rispetto al peso degli inerti.

1.2.2 Struttura della pavimentazione

La struttura della pavimentazione ha il compito di trasferire il carico dal manto al sottofondo. Come illustrato nella precedente fig. 1.1, il carico trasmesso da una ruota al manto viene efficacemente ridotto all'interno della struttura in quanto distribuito su un'ampia area del sottofondo. La struttura della pavimentazione si compone di norma di diversi strati di materiale aventi caratteristiche di resistenza differenti; ogni strato ha la funzione di ripartire il carico che riceve dall'alto su un'area sottostante più ampia. Gli strati posti nella parte alta della struttura sono soggetti a sollecitazioni più elevate rispetto a quelli inferiori e quindi devono essere costruiti con materiali più resistenti. La fig. 1.2 mostra i tipi di materiale solitamente impiegati per la costruzione di pavimentazioni flessibili.

Fig. 1.2 Strati tipici delle pavimentazioni flessibili	Ubicazione nella struttura	Realizzato con
	Manto d'usura	conglomerato bituminoso / impermeabilizzante
	Base	conglomerato bituminoso / misto bitumato / misto cementato / misto granulare
	Fondazione	misto bitumato / misto cementato / misto granulare
	Sottofondo	misto cementato / misto granulare / materiale in sito

La risposta di un materiale ad un carico ad esso imposto dipende in larga misura dalle proprietà elastiche del materiale e dalle caratteristiche del carico (ampiezza, frequenza di sollecitazione ecc.).

Citiamo le principali caratteristiche:

- i materiali granulari, ad es. gli aggregati lapidei di frantumazione e la ghiaia naturale, trasferiscono i carichi applicati attraverso i singoli granuli che formano lo scheletro della struttura. L'attrito intergranulare conserva l'integrità strutturale, ma in presenza di carichi ripetuti (spesso associati ad un incremento del contenuto di umidità) si verifica un graduale processo di addensamento man mano che i granuli si avvicinano gli uni agli altri. Questo fenomeno può avere luogo in qualsiasi livello della struttura della pavimentazione, traducendosi infine in deformazioni permanenti della superficie. Tali deformazioni si manifestano di norma sotto forma di ormaie estese nella zona di passaggio delle ruote dei veicoli;
- i materiali legati, ad es. i misti stabilizzati ed i conglomerati bituminosi, reagiscono piuttosto come una soletta: l'applicazione di un carico verticale sulla superficie di una soletta genera sollecitazioni di compressione orizzontali nella metà superiore della soletta e sollecitazioni di trazione orizzontali nella metà inferiore, con sollecitazioni orizzontali massime nelle parti più alte e in quelle più basse. La deformazione risultante da tali sollecitazioni, in particolare quella derivante da sforzi di trazione nella parte inferiore, causa infine un tipo di rottura da fatica per effetto delle numerose ripetizioni del carico. Si tratta di fessure che

si formano nella parte inferiore dello strato per poi propagarsi verticalmente man mano che le ripetizioni del carico proseguono.

Sia le deformazioni che si creano nel materiale naturale che le fessurazioni da fatica del materiale legato sono correlate al numero di ripetizioni del carico. Ciò consente di determinare la durata di vita funzionale di una pavimentazione in termini di numero di volte che essa può essere esposta ai carichi prima di “cedere”.

1.2.3 Sottofondo

Il materiale naturale supportante la sovrastruttura stradale può essere sia già presente in sito (sterro) o materiale di apporto (riporto). Le caratteristiche di resistenza di tale materiale determinano il tipo di sovrastruttura necessario per ripartire il carico applicato alla superficie in modo tale che esso venga sopportato dal sottofondo senza provocare deformazioni permanenti.

I metodi di dimensionamento delle pavimentazioni stradali utilizzano generalmente, quali principali parametri di input, la resistenza e la rigidità del sottofondo e mirano a realizzare una sovrastruttura avente una resistenza tale da proteggere il sottofondo. Questo approccio fu adottato per la prima volta negli anni Cinquanta del secolo scorso, con il metodo empirico basato sull'indice di portanza californiano (CBR = California Bearing Ratio) ed è ancora in uso nel ventunesimo secolo. In generale, per proteggere un sottofondo di qualità scadente sono necessarie sovrastrutture stradali ad elevato spessore e tale aumento di spessore viene di frequente ottenuto aggiungendo degli strati di sottofondo stabilizzato o migliorato.

Capitolo 2

Tecniche di riciclaggio delle pavimentazioni stradali

2.1 Definizioni

Prima di descrivere le varie tecniche di riciclaggio che vengono utilizzate oggi, si vogliono dare alcune definizioni che possono favorire la comprensione delle tecniche stesse e l'individuazione dei soggetti coinvolti. Nei capitoli successivi alcune di queste definizioni verranno trattate in maniera più approfondita.

RAP (Recalimed Asphalt Pavement)-Fresato: il RAP è il materiale che si ottiene dalla frantumazione a blocchi oppure dalla fresatura a freddo o a caldo degli strati di conglomerato bituminoso, costituenti le pavimentazioni stradali. E' un aggregato con una sua curva granulometrica che contiene bitume invecchiato.

Riciclare : consiste nell'usare uno scarto di lavorazione per produrre un nuovo prodotto, diverso da quello di partenza. Il processo di riciclaggio contiene in se una trasformazione. In campo stradale per riciclaggio si intende qualsiasi possibilità di recuperare e riutilizzare il fresato nella produzione di un nuovo conglomerato bituminoso. Dunque sarebbe più opportuno parlare di recupero o riutilizzo del fresato. Inoltre nel caso del fresato il processo di riciclaggio non contiene una trasformazione, in quanto da conglomerato bituminoso si ottiene altro conglomerato bituminoso. In genere il fresato viene recuperato e riutilizzato totalmente.

Emulsione bituminosa: l'emulsione bituminosa è una dispersione di bitume in acqua. Per disperdere il bitume in acqua è necessario utilizzare energia meccanica di taglio e un agente tensioattivo o emulsionante. Scientificamente, un emulsione è un sistema eterogeneo termodinamicamente sotto forma di goccioline. Tale sistema possiede una sua stabilità minima che può essere aumentata attraverso l'aggiunta di appropriati agenti tensioattivi che abbassano la tensione bituminosa. oltre alle due fasi principali (acqua e bitume), deve contenere degli agenti chimici adeguati, destinati a favorire il mantenimento dell'equilibrio tra le due fasi.

Ricapitolando le componenti di un emulsione bituminosa sono:

- bitume;
- fluidificanti (aggiunti al bitume);
- acqua;
- emulsionanti Anionici (carica -) o Cationici (carica +).

Riciclare il fresato: il riciclaggio del fresato può avvenire nei seguenti modi:

- tramite riscaldamento nelle attività a caldo;
- tramite aggiunta di leganti e rigeneranti nelle attività a freddo.

Per caldo si intendono tutte quelle tecniche che permettono il riutilizzo del conglomerato bituminoso ed in cui l'aggregato lapideo di primo impiego, aggiunto all'atto del confezionamento, è prevalentemente riscaldato e portato ad un'idonea temperatura (oltre 150°C).

Tutte le restanti tecniche si possono considerare a freddo, anche quelle in cui il legante non viene usato proprio a temperatura ambiente.

Dunque si può riassumere la distinzione tra le due tecniche nel seguente modo:

- tecniche a caldo: con apporto di energia tecnica agli inerti;
- tecniche a freddo: nessun riscaldamento degli inerti.

Un'altra distinzione che è possibile fare per classificare le tecniche di riciclaggio si basa sul luogo di confezionamento della miscela. Distinguiamo le seguenti modalità:

- in impianto fisso
 - impianti di produzione del conglomerato bituminoso a caldo, sia continui che discontinui, opportunamente costruiti e resi atti al riutilizzo del fresato
 - impianti di produzione specifici per il riciclaggio a freddo, oppure tramite impianti per la produzione di misto cementato opportunamente modificati
- in sito
 - appositi treni di riciclaggio a permettono di riciclare la pavimentazione stradale sul posto sia a caldo che a freddo

Prodotto finale: il conglomerato che si ottiene è prevalentemente studiato al fine di garantire il raggiungimento dei requisiti prestazionali richiesti. La formulazione della miscela consiste nel miglior proporzionamento dei vari componenti costituenti il conglomerato bituminoso. Tale proporzionamento porta ad individuare:

- il giusto assortimento di tutti gli aggregati;
- la percentuale ottima di acqua (fluido);
- la percentuale ottima di legante ;
- eventuali additivi.

Rigenerare: la rigenerazione è l'atto finale del riciclare. Il fresato è stato interamente recuperato e riutilizzato, riportando la pavimentazione stradale alla sua funzione originaria.

2.2 La filosofia del riciclaggio

Oggi più che in passato, la conoscenza dei benefici che il riciclaggio in impianto ed in sito può dare in termini di recupero di materiale e costi di trasporto ed energia, coinvolge tutti i fattori che influenzano il ciclo di vita del prodotto finale.

Tutti i recenti studi effettuati sulle pavimentazioni realizzate con leganti idraulici (cemento) o con leganti idrocarburici (bitume), mostrano l'importanza del riciclaggio nell'avere una pavimentazione stradale che dura nel tempo.

Dunque, se si volesse dare una definizione di pavimentazione efficiente e duratura potremmo usare la seguente: "una pavimentazione sicura ed efficiente, rispettosa dell'ambiente e che risponda alle esigenze degli utenti attuali senza compromettere quelle delle generazioni future".

Al fine di rispettare tale definizione, nella progettazione o riqualificazione di una pavimentazione, sarà necessario raggiungere i seguenti obiettivi:

- ottimizzazione dell'uso delle risorse naturali e riduzione del consumo di energia;
- riduzione delle emissioni che possono avere impatto negativo sull'effetto serra;
- riduzione dell'emissione di inquinanti in generale;
- miglioramento delle condizioni di salute, della sicurezza e della prevenzione dei rischi;
- miglioramento delle condizioni di comfort per gli utenti.

Nella pratica comune, oltre le ragioni ambientali sopra descritte, l'uso del riciclaggio dei materiali per la riqualificazione delle strade si sta diffondendo per le seguenti ragioni:

- Ragioni economiche: in particolare si fa riferimento alla scarsità di aggregati vergini e materiale naturale, soprattutto in prossimità delle aree urbane. A questo bisogna aggiungere come sia sempre più difficile aprire nuove cave o siti di estrazione. Infine bisogna tener conto del costo dell'energia. Se pensiamo che un barile di petrolio costa più di 100 \$ e che il costo del bitume incide per il 35% sul costo di realizzazione di un'unità di conglomerato bituminoso, allora si nota immediatamente come l'energia a basso costo sia solo un ricordo del passato.
- Ragioni riguardanti lo sviluppo di nuove tecnologie e mezzi: le tecniche di riciclaggio, siano esse applicate in sito o in impianto, a caldo o a freddo, hanno permesso lo sviluppo di nuovi approcci costruttivi in cui è previsto l'uso di risorse che in passato erano semplicemente considerate scarti da smaltire in

discarica. Inoltre hanno favorito lo sviluppo di tecnologie innovative che permettessero l'applicazione delle tecniche suddette. Come spesso capita, lo sviluppo di queste nuove tecniche ha generato "conoscenza scientifica", portando un miglioramento in tutti quei campi che da essa vengono interessati (macchinari, prodotti, approccio progettuale)

- Ragioni legali: da qualche anno il riciclaggio totale o parziale di una pavimentazione è entrato a far parte di quelle alternative previste anche a livello legale. In alcuni paesi europei, dove il riciclaggio risulta più diffuso che in Italia, sono state messe a punto norme che incentivano fortemente l'uso della tecnica tutte le volte che l'intervento da effettuare lo permette.

2.3 Metodi di riciclaggio

Come detto in precedenza le soluzioni di riciclaggio possono essere distinte in due categorie:

- riciclaggio in impianto fisso;
- riciclaggio in-sito.

Nel caso di riciclaggio in impianto fisso il materiale fresato dalla pavimentazione deve essere trasportato dal luogo di recupero all'impianto stesso per poi essere inserito nel ciclo produttivo e quindi riutilizzato. I principali vantaggi del riciclaggio in impianto fisso sono i seguenti:

- alta qualità tecnica del processo di riciclaggio: la frantumazione, il setaccio e la miscela degli aggregati risultano essere migliori, inoltre si ha la possibilità di effettuare maggiori analisi di laboratorio, e dunque controlli di qualità, sul materiale fresato e sul prodotto finale;
- il prodotto finale risulta essere più omogeneo e si ha la possibilità di uno stoccaggio temporaneo;
- si ha una maggiore flessibilità nella produzione di diverse miscele e dal punto di vista operativo.

Allo stesso tempo sono da menzionare i difetti del riciclaggio in impianto fisso:

- si hanno maggiori costi di trasporto. Il materiale deve essere trasportato dal cantiere operativo all'impianto fisso e riportato in cantiere una volta realizzata la miscela;
- si hanno maggiori costi di stoccaggio e gestione del materiale in cantiere;
- in impianto, nonostante l'omogeneità della miscela, non è possibile creare miscele con percentuali di riutilizzo del RAP superiori al 50-60%;
- l'impatto sul traffico veicolare in prossimità del cantiere risulta maggiore.

Nel riciclaggio in-sito i costi di trasporto e gestione del materiale fresato sono ridotti al minimo, l'impatto sulla viabilità in prossimità del cantiere risulta minima ed occasionale, si può arrivare a riciclare il 100% del RAP. Questi sono i principali vantaggi che rendono il riciclaggio in-sito una delle alternative di intervento più appetibili.

Sia il riciclaggio in impianto fisso che in-sito, a loro volta possono essere suddivisi in due sottocategorie distinte per la temperatura a cui viene lavorato il RAP. In particolare distinguiamo:

- riciclaggio a caldo;
- riciclaggio a freddo.

2.3.1 Riciclaggio in impianto fisso

2.3.1.1 Riciclaggio in impianto fisso a caldo

Il Rap (Recalimed Asphalt Pavement-Fresato) viene trasportato all'impianto di produzione del conglomerato a caldo, li viene inserito nel processo di produzione della nuova miscela mescolando con aggregati vergini, bitume vergine ed eventualmente con un rigenerante (vedremo successivamente i vari tipi di rigenerazione e l'azione che essi hanno sul bitume proveniente dal RAP). Il RAP prima di essere inserito nel processo di produzione viene asciugato e riscaldato. Queste operazioni di essiccamento e riscaldamento portano ad i seguenti vantaggi:

- nella miscela non è presente acqua residua che possa intaccare i fenomeni di adesione e coesione del nuovo bitume;

- con il riscaldamento si favorisce il rammollimento del bitume proveniente dal RAP favorendo le operazioni di rigenerazione del RAP stesso.

In tabella si riportano le diverse percentuali di RAP che si possono riciclare in funzione del tipo di impianto.

2.3.1.2 Riciclaggio in impianto fisso a freddo

I leganti idrocarburici utilizzati in questo metodo sono le emulsioni bituminose ed il bitume schiumato. Il prodotto finale rimane bagnato e nel caso in cui il grado di invecchiamento del bitume proveniente dal RAP non è eccessivo, è possibile utilizzare un rigenerante per favorire la riattivazione del vecchio bitume.

2.3.2 Riciclaggio in-sito

2.3.2.1 Riciclaggio in-sito a caldo

Per riciclaggio in-sito a caldo si intende quella tecnica che prevede l'uso di un tamburo essiccatore del tutto simile a quello usato negli impianti fissi continui.

Le fasi principali del riciclaggio in-sito a caldo sono:

- stesa sulla pavimentazione stradale di eventuali inerti vergini di correzione;
- fresatura con una o due frese a freddo fino ad alla profondità voluta;
- il RAP viene raccolto da un'unità mobile che comprende tutta la filiera di produzione della nuova miscela, compreso il silos di stoccaggio del nuovo bitume. Come nel caso degli impianti fissi il materiale raccolto viene asciugato e riscaldato fino ad una temperatura di 140-170°C. Il bitume di apporto viene inserito nel miscelatore all'estremità finale del tamburo;
- la miscela viene stesa per tutta la larghezza dell'area di intervento attraverso una classica vibrofinitrice;
- la miscela viene compattata secondo i metodi tradizionali.

La qualità della miscela è del tutto simile a quella che si otterrebbe in impianto fisso.

2.3.2.2 Riciclaggio superficiale in-sito a caldo-Termorigenerazione

La termorigenerazione degli strati superficiali delle pavimentazioni comprende tutte le operazioni previste dalle varie tecniche di riciclaggio in-sito a caldo. Si ha fresatura della pavimentazione, il mescolamento con o senza inerti di correzione o legante e la immediata stesa della miscela riciclata. Questo tipo di intervento, però, risulta efficiente per profondità di intervento che non superano i 40mm.

Questa tecnica risulta parecchio utile nel caso in cui si vogliano migliorare le caratteristiche superficiali di una pavimentazione come l'aderenza e l'impermeabilità. Allo stesso tempo va ricordato che intervenendo attraverso la termorigenerazione non si produce alcun incremento di resistenza della pavimentazione.

Nell'effettuare la termorigenerazione, dopo che la pavimentazione è stata riscaldata, si hanno due metodi di mescolamento:

- scarifica e realizzazione della miscela in speciale tamburo che lavora a bassa velocità, ma sullo stesso principio del classico tamburo mescolatore per impianti fissi. In questo caso il materiale non risulta asportato ed il bitume di apporto avviene direttamente aggiunto in sito;
- frantumazione della pavimentazione e successivo passaggio in mescolatore a doppia colonna con o senza fondo. In questo caso il rivestimento degli aggregati risulta di gran lunga migliore.

L'uso di un agente rigenerante è vivamente consigliato al fine di favorire il mescolamento tra vecchio e nuovo bitume. Infine la miscela viene stesa e compattata.

Questo metodo di riciclaggio del 100% del RAP è molto efficiente, ma risulta essere limitato da una profondità di intervento ridotta (4 cm superficiali). In passato si è notato come questa tecnica sia risultata inefficiente solo nei casi in cui gli interventi non siano stati proceduti da indagini preliminari accurate. In particolare se i problemi riguardano gli strati profondi della pavimentazione, l'intervento di termorigenerazione risulta inutile vista la sua azione superficiale.

2.3.2.3 Riciclaggio in-sito a basse temperature (tiepido e semi-tiepido)

La tecnica del riciclaggio a basse temperature risulta essere di nuova concezione ed applicata solo da pochi anni. Essa è caratterizzata da temperature della miscela finale che vanno dagli 80. ai 90 °C per il semi tiepido e da 110 a 130 °C per il tiepido. Queste temperature permettono quindi l'uso di bitume schiumato e emulsioni bituminose.

I treni di riciclaggio possono essere adattati per l'utilizzo di entrambe i leganti, i quali sono iniettati nella parte posteriore del tamburo e mescolati con il RAP preriscaldato.

I principali vantaggi di entrambe le tecniche (tiepido e semi tiepido) sono:

- risparmio di energia dal 20 al 50 % rispetto alle tecniche a caldo;
- notevole riduzione nelle emissioni di gas inquinanti;
- uso del bitume a temperatura notevolmente inferiore rispetto a quella critica per cui si ha rilascio di sostanze idrocarburiche aromatiche.

La miscela che si ottiene risulta avere una buona lavorabilità ed i tempi di attesa per la riapertura al traffico della strada sono ridotti.

2.3.2.4 Riciclaggio in-sito a freddo

La tecnica del riciclaggio a freddo viene utilizzata per la rigenerazione di pavimentazioni bituminose con una profondità di intervento che va da 40 a 200mm. Il materiale fresato (RAP) non viene ne essiccato, ne pre-riscaldato e può essere legato con bitume, cemento o sciolto. I leganti, emulsione bituminosa e/o cemento, vengono aggiunti all'atto del mescolamento o in un mescolatore apposito. Con eccezione per pavimentazioni rurali o strade secondarie di scarsa importanza, in questa tecnica è necessario rivestire gli strati riciclati a freddo con un tappetino di usura che permetta di rispettare le specifiche tecniche in termini di aderenza.

Nel capitolo successivo vedremo più nel dettaglio tutti gli aspetti riguardanti il riciclaggio a freddo in-sito.

2.4 Scelta della soluzione d'intervento

Negli interventi di riciclaggio, in genere, non esiste una soluzione universalmente valida. Tutto dipende dalle singole situazioni che il tecnico trova in sito, dalle condizioni della pavimentazione, dal tipo di problema che essa presenta, dalla reperibilità o meno di materiale vergine, dalla disponibilità economica della committenza.

Dal punto di vista tecnologico, tra i vari parametri che influenzano la scelta della soluzione di riciclaggio, vale la pena ricordare i seguenti:

- natura del danno afferente la pavimentazione ;
- tipo di pavimentazione;
- vita utile residua;
- dimensioni dell'intervento;
- natura, quantità, qualità ed omogeneità del conglomerato bituminoso che deve essere riciclato;
- quantità di conglomerato bituminoso da riciclare contaminato;
- organizzazione dell'intervento;
- standard qualitativo che si vuole raggiungere;
- aspetti ambientali.

Dal punto di vista economico in genere si parte da un'analisi economica del ciclo di vita della pavimentazione. In particolare si osserva la vita utile residua e la si confronta con quella che avrebbe la pavimentazione al variare degli interventi di riciclaggio.

In generale gli interventi di riciclaggio in-sito risultano meno costosi per le seguenti ragioni:

- assenza dei costi di trasporto;
- assenza di aeree di stoccaggio del RAP;
- minore influenza del cantiere sul normale deflusso del traffico veicolare. Ciò si traduce in un minor consumo d'energia da parte degli utenti e dunque della comunità, come anche in una riduzione del tempo perso in coda, sia dai privati cittadini che dagli autotrasportatori.

Nelle tabelle successive si riassumono vantaggi e svantaggi delle diverse tecniche confrontandole tra loro in base alla temperatura (caldo-tiepido-freddo) ed al luogo di realizzazione della miscela (in-sito-in impianto fisso).

Capitolo 3

Tecniche di riciclaggio a freddo

3.1 Generalità

Questo capitolo descrive le varie tipologie di processo di riciclaggio a freddo e presenta le attrezzature necessarie per eseguire tali interventi. Inoltre illustra i vantaggi risultanti dall'adozione di tale processo ed i principali fattori che influiscono sull'idoneità del riciclaggio a freddo per l'esecuzione di determinati progetti.

3.2 Il processo di riciclaggio a freddo

Il riciclaggio a freddo può avvenire “in-plant”, cioè trasportando il materiale recuperato da una strada esistente ad un deposito centralizzato, dove viene rigenerato in un apposito impianto fisso (ad es. un mescolatore forzato), oppure “in-place”, ossia in sito, utilizzando una macchina riciclatrice. Il riciclaggio in impianto fisso è spesso l’opzione più onerosa in termini di costo per metro cubo di materiale rigenerato, soprattutto perché si deve sostenere il costo del trasporto, che viene meno riciclando il materiale in sito. Ciò nonostante entrambi i metodi di riciclaggio hanno il loro posto nell’industria delle costruzioni, e la scelta di quello più idoneo agli interventi da eseguire è dettata dai seguenti fattori:

- il tipo di costruzione. Normalmente la rigenerazione in impianto fisso è presa in considerazione nei casi in cui il materiale riciclato deve essere usato per la costruzione di un nuovo strato della pavimentazione, ad es. per aumentare la portanza di una pavimentazione esistente;
- il materiale presente in sito, ossia nella pavimentazione esistente da riciclare. Se si deve riciclare il materiale degli strati superiori di una pavimentazione esistente, la variabilità e/o le condizioni del materiale riciclato giustificano talvolta un processo di selezione o di pretrattamento (ad es. la scarifica di strati spessi di conglomerato bituminoso in sito con successiva vagliatura).

La rigenerazione in sito ha acquisito popolarità grazie all’avvento di macchine riciclatrici grandi e potenti, in grado di ripristinare le pavimentazioni ad una frazione del costo dei metodi di ricostruzione convenzionali. Inoltre, alla luce dello stato di degrado delle pavimentazioni stradali in ogni parte del mondo, la necessità di ripristinare le pavimentazioni esistenti è di gran lunga più consistente della domanda di nuove infrastrutture viarie. In conseguenza di ciò, il riciclaggio in sito è diventato in molti Paesi il metodo preferito quando si tratta di recuperare tempo per smaltire l’enorme lavoro arretrato nel ripristino delle pavimentazioni.

3.2.1 Riciclaggio in impianto fisso

La rigenerazione in impianto fisso rimane sempre un'opzione da prendere in considerazione quando il riciclaggio è possibile, in particolare nel caso in cui si debba rigenerare una miscela di materiali riciclati e vergini, e specialmente quando la rigenerazione avvenga con bitume schiumato a fini di stoccaggio del materiale riciclato per un uso successivo.

I principali vantaggi offerti dal confezionamento delle miscele in un impianto fisso rispetto alla miscelazione in sito comprendono tra l'altro:

- **Controllo dei materiali aggiunti.** Mentre il riciclaggio in sito permette di eseguire solo pochi controlli sul materiale recuperato da una pavimentazione esistente, confezionando le miscele in un impianto centralizzato si può ottenere un prodotto finale conforme a specifici requisiti aggiungendovi diversi tipi di aggregato. I materiali da aggiungere possono essere stoccati e testati prima della miscelazione e le rispettive percentuali possono essere modificate secondo le esigenze.
- **Qualità di miscelazione.** Si possono impostare diversi parametri operativi del mescolatore forzato per variare opportunamente il tempo che il materiale trascorre nel vano di miscelazione, in modo da modificare la qualità della miscela.
- **Stoccabilità.** Specialmente nel caso di materiale trattato con bitume schiumato il prodotto miscelato può essere messo a parco e usato nel momento in cui è richiesto. Perciò viene meno l'interdipendenza fra il processo di miscelazione e quello di stesa.

3.2.2 Riciclaggio in sito

Le macchine riciclatrici sono frese a freddo modificate o stabilizzatrici adattate che si sono evolute nel tempo. Progettate specificamente per essere in grado di riciclare in una sola passata strati di pavimentazione di grande spessore, le moderne riciclatrici sono di norma macchine grandi e ad elevate prestazioni, montate su cingoli o su grosse ruote gommate.

Il “cuore” di una riciclatrice è costituito dal rotore di fresatura e miscelazione, che è munito di un grande numero di utensili da taglio speciali. Di norma tale rotore ruota in senso opposto a quello di marcia, polverizzando il materiale della pavimentazione esistente, come illustrato in fig. 3.1.

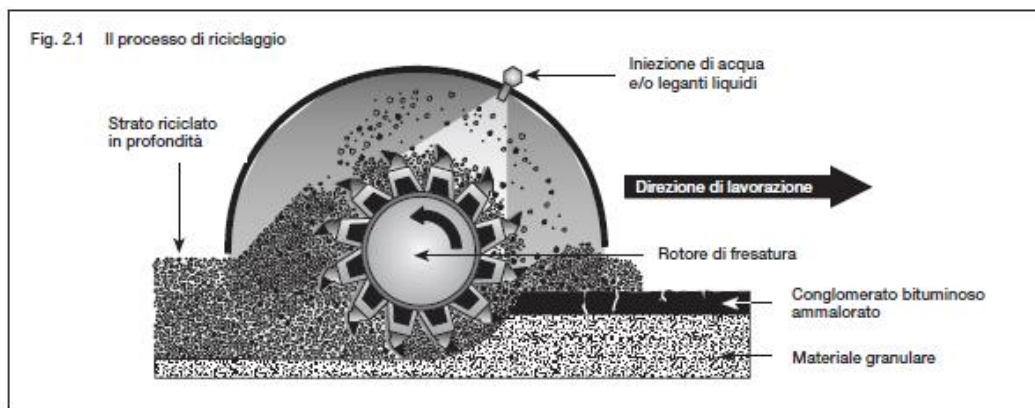


fig. 3.1 Il processo di riciclaggio

Mentre la macchina avanza con il rullo di fresatura rotante, l'acqua, contenuta in un'autobotte collegata alla riciclatrice, viene erogata mediante un tubo flessibile e spruzzata all'interno del vano di miscelazione della riciclatrice. La quantità dell'acqua viene dosata con precisione tramite un impianto di pompaggio controllato da microprocessore, ed il rullo rotante mescola accuratamente l'acqua con il materiale riciclato, onde ottenere il tenore di umidità necessario per raggiungere elevati gradi di costipamento. In modo simile possono essere iniettati direttamente nel vano di miscelazione anche dei leganti liquidi, quali una boiaccia cementizia o un'emulsione bituminosa, sia singolarmente che insieme. Inoltre è possibile iniettare nel vano di miscelazione pure del bitume schiumato mediante una separata barra spruzzatrice appositamente progettata. I leganti in polvere, quali ad es. la calce idrata, vengono normalmente sparsi sulla pavimentazione esistente, nel tratto antistante la riciclatrice. Quest'ultima passa sopra la polvere e la miscela in un'unica passata con il materiale fresato e l'acqua iniettata.

I treni di riciclaggio possono avere configurazioni diverse a seconda del tipo di applicazione e del tipo di legante impiegato.

In tutti i casi, comunque, la riciclatrice funge da locomotiva e spinge o traina l'attrezzatura ad essa agganciata mediante barre di spinta o di traino. Le figure 3.2 e 3.3 illustrano le composizioni tipiche dei treni di riciclaggio.

Il treno di riciclaggio mostrato in fig. 3.2 viene usato quando il materiale riciclato viene stabilizzato con una boiaccia cementizia.

Prima della miscelazione, le dosi di cemento e acqua prescritte sono misurate con precisione in modo da formare una sospensione che viene quindi pompata attraverso un tubo flessibile alla riciclatrice e iniettata nel vano di miscelazione. In alternativa, il cemento può essere sparso anche in forma pulverulenta sulla pavimentazione dinanzi alla riciclatrice. In tal caso il miscelatore di sospensioni viene sostituito da un'autobotte per acqua.

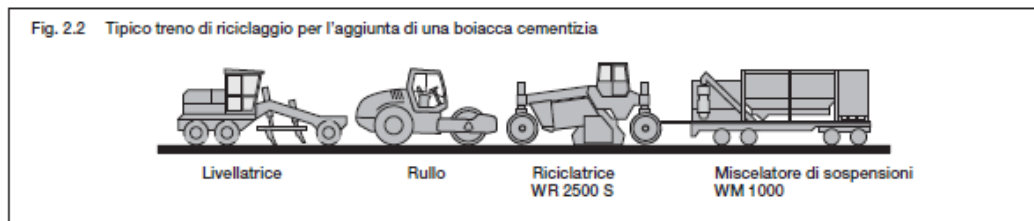


fig. 3.2 Tipico treno di riciclaggio per l'aggiunta di una boiaccia cementizia

Il materiale uscente dalla riciclatrice viene precompattato da un rullo vibrante pesante per ottenere un grado di addensamento uniforme in tutto il materiale riciclato. Di seguito, il materiale viene profilato da una motolivellatrice prima di essere costipato da rulli vibranti e rulli gommati. Nel caso in cui si usi un'emulsione bituminosa o bitume schiumato insieme ad una boiaccia cementizia, il treno di riciclaggio avrà una configurazione simile: un'autocisterna di bitume viene posizionata davanti al miscelatore di sospensioni, dal quale viene spinta, come illustrato in fig. 3.3. Qualora il cemento venga sparso in forma pulverulenta sulla superficie stradale antistante il treno di riciclaggio, la cisterna di bitume è agganciata direttamente alla riciclatrice, e in testa al treno spinto viene posta un'autobotte d'acqua che funge da veicolo capofila. Se la riciclatrice è dotata

di cingoli e di un banco di stesa, come mostrato in fig. 3.3, l'utilizzo di una motolivellatrice per profilare la superficie potrebbe risultare superfluo.

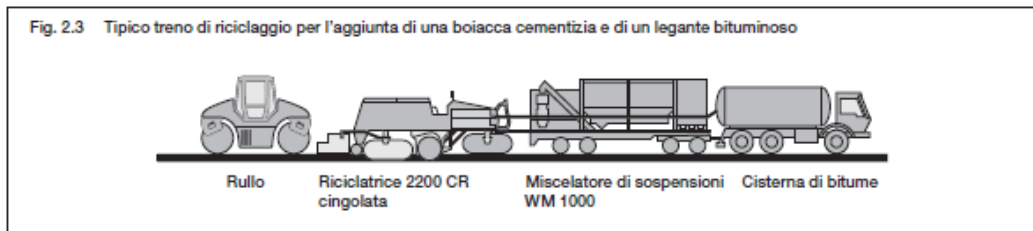


fig. 3.3 Tipico treno di riciclaggio per l'aggiunta di una boiaccia cementizia e di un legante bituminoso

3.3 Applicazioni possibili del riciclaggio a freddo

Il riciclaggio a freddo è un processo con molte sfaccettature, in grado di soddisfare varie esigenze in sede di manutenzione e ripristino dell'infrastruttura viaria. Può essere suddiviso in due categorie fondamentali, a seconda che il materiale riciclato venga trattato o meno con un legante. Come secondo criterio di classificazione, le due categorie (con o senza legante) possono essere a loro volta suddivise in base al tipo di trattamento che riceve il materiale riciclato. Tale sistema di classificazione primaria e secondaria è illustrato in fig. 3.4. L'abbreviazione "RAP" usata nella figura 3.4 e altrove nel seguito si riferisce a "Recycled Asphalt Pavement" o "Reclaimed Asphalt Pavement" (letteralmente: pavimentazione d'asfalto riciclato), un termine comunemente usato in tutto il mondo per designare il conglomerato bituminoso fresato, spesso chiamato per semplicità "fresato bituminoso" o "fresato" dagli addetti ai lavori. Le diverse categorie elencate in fig. 3.4 (riciclaggio di RAP al 100%, stabilizzazione di materiale granulare non legato e/o RAP, stabilizzazione meccanica, rilavorazione e polverizzazione) sono spiegate di seguito.

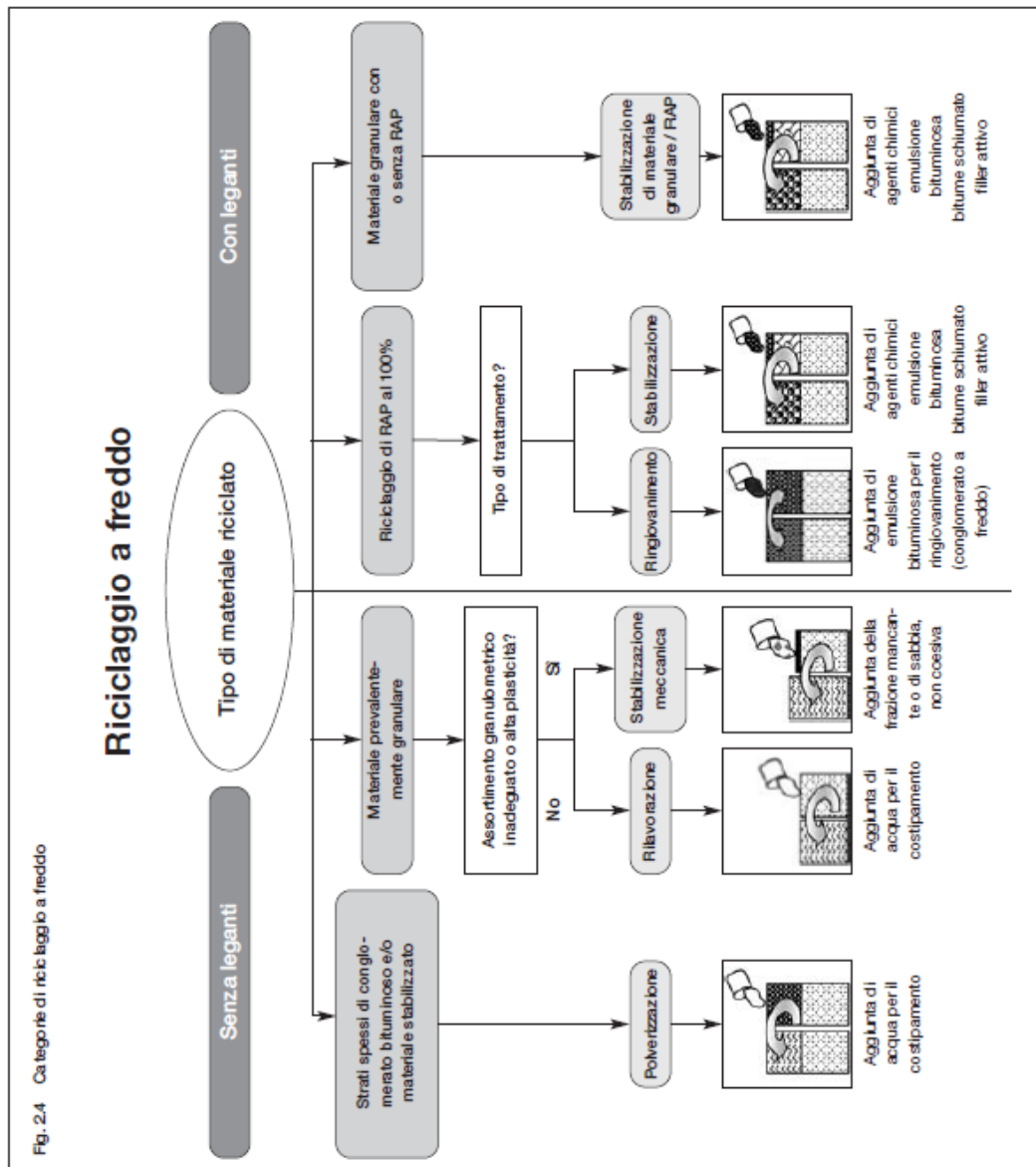


fig.3.4 Catalogo di riciclaggio a freddo

3.3.1 Riciclaggio di RAP al 100%

Questa categoria comprende il riciclaggio di solo fresato bituminoso. Vanno presi in considerazione i seguenti fattori:

- tipo e composizione della pavimentazione esistente (ad es. tipo di conglomerato bituminoso, assortimento granulometrico, contenuto di legante, grado d'invecchiamento ecc.);
- tipo e causa dell'ammaloramento (ad es. fessurazione o deformazione permanente);
- estensione del danno (ad es. limitato allo strato d'usura o esteso più in profondità);
- obiettivo dell'intervento di ripristino (ad es. ripristino dell'integrità strutturale).

Per il riciclaggio di RAP al 100% si possono adottare due tecnologie differenti:

- realizzazione di uno strato in conglomerato bituminoso a freddo mediante aggiunta di emulsione bituminosa con funzione di rigenerante ad uno strato riciclato relativamente sottile (normalmente avente uno spessore massimo di 100 mm);
- stabilizzazione del RAP con cemento, emulsione bituminosa o bitume schiumato in uno strato più profondo (per lo più con oltre 100 mm di spessore).

Se il RAP al 100% deve essere riciclato come conglomerato bituminoso a freddo, è necessaria l'aggiunta di bitume sotto forma di un'emulsione. Si tratta essenzialmente di un processo di ringiovanimento. L'aggiunta di un legante in un conglomerato bituminoso esistente senza compromettere le proprietà volumetriche del materiale riciclato richiede tuttavia un accurato approccio progettuale. L'assortimento granulometrico dello strato riciclato sarà diverso da quello del conglomerato bituminoso originale. Inoltre la frazione fine è spesso legata nel materiale riciclato. Spesso ciò significa che durante il riciclaggio bisogna aggiungere degli aggregati fini.

Se il RAP al 100% viene stabilizzato con un legante, le proprietà del prodotto saranno diverse da quelle ottenute con un processo di ringiovanimento. Di norma occorre stendere sullo strato riciclato uno strato d'usura sufficientemente spesso per ottenere caratteristiche funzionali come l'aderenza e la regolarità superficiale. Nelle strade a minor volume di traffico ciò potrà avvenire sotto forma di un trattamento superficiale con granigliatura o di un sottile (< 40 mm) tappeto d'usura in conglomerato bituminoso a caldo.

Qualora una pavimentazione debba essere rinforzata per resistere al traffico pesante, oltre allo strato d'usura in conglomerato bituminoso si rende normalmente necessario anche uno strato di base nello stesso materiale.

3.3.2 Stabilizzazione di materiale granulare/RAP

Questa forma del riciclaggio a freddo viene di norma eseguita per rigenerare le sovrastrutture ammalorate costituite da strati di base in misto granulare ricoperte da strati d'usura relativamente sottili realizzati o in conglomerato bituminoso oppure mediante vari trattamenti superficiali. In tali pavimentazioni gli ammaloramenti si manifestano di solito sotto forma di strati in conglomerato bituminoso con fessurazioni estese, strati granulari deformati e buche. L'aggiunta di leganti durante il riciclaggio si esegue con l'obiettivo di migliorare le proprietà meccaniche dei materiali recuperati, in modo tale da ripristinare l'integrità strutturale e ottenere la regolarità superficiale richiesta.

La stabilizzazione del materiale granulare/RAP può avvenire mediante riciclaggio a diverse profondità, solitamente comprese fra 150 e 250 mm. Se deve essere migliorata la capacità strutturale per rispondere ad una maggiore domanda di traffico, si può aumentare la profondità di riciclaggio in modo da incrementare lo spessore del nuovo strato stabilizzato. Per poter esercitare questa opzione occorre avere nella pavimentazione esistente del materiale naturale di buona qualità fino ad una profondità sufficiente. Si possono riciclare anche pavimentazioni ammalorate che comprendono già degli strati stabilizzati (ad es. con calce idrata o cemento).

Nei casi in cui per la carenza di risorse finanziarie si persegua una strategia di ripristino a breve termine o l'ammaloramento sia circoscritto a lesioni negli strati superiori, si può ridurre la profondità di riciclaggio. In seguito alla stabilizzazione si otterrà sempre un incremento significativo della capacità strutturale della pavimentazione, rafforzato ulteriormente dallo strato d'usura in conglomerato bituminoso steso sullo strato riciclato. Se con la stabilizzazione si riesce a limitare l'infiltrazione d'acqua negli strati inferiori, di norma si prolunga anche la vita utile della pavimentazione riciclata.

In questa categoria di riciclaggio rientrano anche i trattamenti di depolverizzazione di strade bianche, caratterizzate da pavimentazioni tipo macadam in misto granulare non legato. Tali trattamenti vengono di norma eseguiti per:

- Motivi economici. Alti costi di manutenzione sono normalmente correlati ad accresciuti volumi di traffico.
- Motivi ecologici. Le strade in macadam perdono in genere ogni anno pietrisco per uno spessore compreso fra 25 e 35 mm, per cui si rende necessaria la

continua ripavimentazione con materiale proveniente da cave di prestito; inoltre si è rilevato che la polvere sollevata nelle strade bianche nuoce alla salute.

- Motivi strategici: la sicurezza degli utenti della strada in condizioni di bagnato oppure esigenze politiche.

Lo strato d'usura in pietrisco esistente viene solitamente riciclato con l'aggiunta di leganti. Se allo scopo si usa un'emulsione bituminosa o bitume schiumato, la profondità di riciclaggio sarà di norma compresa fra 125 e 150 mm, e successivamente verrà steso uno strato d'usura sottile, ad es. un microtappeto a freddo (slurry seal), oppure si dovrà procedere ad un trattamento superficiale con granigliatura. In caso di stabilizzazione con cemento o calce idrata la profondità di riciclaggio deve essere incrementata a 150-250 mm per ottenere un prodotto simile in termini di vita strutturale ma non di durabilità. Un'altra applicazione che rientra in questa categoria è la modificazione di materiale plastico mediante riciclaggio con calce idrata. Durante il processo di riciclaggio viene aggiunta soltanto una quantità sufficiente di calce per modificare (eliminare) la plasticità. Questo processo non è considerato un intervento di stabilizzazione, dal momento che la calce non viene aggiunta per aumentare la resistenza (benché nel lungo periodo possa portare ad un aumento della stessa).

3.4 Applicazioni senza leganti

3.4.1 Polverizzazione

Se la pavimentazione esistente da riciclare è costituita da strati in conglomerato bituminoso di grande spessore non è sempre necessario aggiungere un legante. Gli strati spessi di conglomerato bituminoso che presentano gravi fessurazioni da fatica vanno trattati preferibilmente polverizzando l'intero pacchetto degli strati legati a bitume, con successivo costipamento per creare una sorta di "materiale granulare rigenerato". Per ottenere una sovrastruttura equilibrata, su un tale strato rigenerato vengono di solito stesi nuovi strati di base e d'usura in conglomerato bituminoso. Anche le pavimentazioni che presentano strati di base ammalorati in misto cementato possono essere trattate efficacemente mediante polverizzazione. Gli strati legati che hanno subito danni

presentano solitamente delle fessurazioni a blocchi che all'inizio si verificano a lunghi intervalli per poi succedersi a distanza sempre più ravvicinata. La polverizzazione di tali materiali elimina il rischio di fessurazione riflessa.

3.4.2 Rilavorazione

La depolverizzazione delle strade bianche viene spesso eseguita senza l'aggiunta di leganti. Ciò nonostante può essere auspicabile rilavorare e ricompattare il materiale esistente nella parte superiore della pavimentazione in modo da renderlo omogeneo prima di ricoprirlo con un nuovo strato di materiale d'apporto. Anche se non si aggiunge un legante, il tenore di umidità del materiale in sito deve essere di norma adattato per garantire un costipamento ottimale. Nella categoria della rilavorazione rientrano anche le nuove strade costruite su materiali in sito. Se il sottofondo esistente è idoneo, l'opzione della rilavorazione è una valida alternativa alla "scarifica e rullatura", operazioni tradizionalmente eseguite nelle nuove costruzioni stradali. In tal modo si ottiene uno strato di appoggio omogeneo, caratterizzato da una maggiore consistenza.

3.4.3 Stabilizzazione meccanica

Da indagini su pavimentazioni emerge talvolta che la causa di un danno o di un ammaloramento strutturale è riconducibile all'inadeguato assortimento granulometrico del materiale nello strato granulare superiore. In tali casi è possibile correggere l'assortimento mescolandovi la frazione mancante, che viene sparsa sulla superficie prima del riciclaggio. Durante il riciclaggio si procederà all'adattamento del tenore di umidità per creare condizioni ottimali per il costipamento del materiale riciclato.

La stabilizzazione meccanica può essere usata anche per il trattamento di materiali caratterizzati da eccessiva plasticità. In taluni casi è possibile trattare materiali argillosi in sito mediante miscelazione con sabbia, non coesiva, per ridurre la plasticità effettiva. Però questa tecnica andrebbe praticata con cautela, dal momento che la separazione meccanica dei granuli plastici non comporta una riduzione chimica della plasticità e può

darsi che le prestazioni non migliorino se la granulometria della sabbia non è compatibile con la natura e la granulometria del materiale plastico.

Capitolo 4

Procedure di mix design

Generalità

Nel seguente capitolo saranno illustrate le procedure più accreditate presenti nel panorama nazionale ed internazionale.

Le procedure presenti in letteratura sono molteplici, alcune molto simili tra loro, altre molto differenti. In ogni caso, tutte le procedure prevedono due fasi distinte tra loro:

- determinazione del contenuto ottimo di fluido totale (OFC – Optimum Fluid Content);

- determinazione del contenuto ottimo di emulsione bituminosa (OEC – Optimum Emulsion Content).

La prima fase ha come scopo la determinazione del contenuto di fluido totale che permette il massimo addensamento della miscela. La miscela ha il fine di determinare la quantità di emulsione bituminosa, e quindi di bitume proveniente dall'emulsione, che permette di massimizzare le caratteristiche meccaniche della miscela.

E' importante precisare che per fluido totale si intende la somma delle percentuali in peso dell'emulsione bituminosa e dell' acqua di apporto rispetto al peso del fresato. Si fa riferimento al peso del fresato e non degli inerti in quanto la differenza sarebbe minima. Infatti la percentuale di bitume nel fresato è sufficientemente bassa da commettere un errore piccolo, dell'ordine dello 0,1%. In ogni caso è sempre bene verificare, volta per volta, l'errore che commesso.

Attraverso l'esposizione delle diverse procedure si constaterà come la differenze principali tra una procedura e l'altra sono:

- le modalità in cui le due fasi vengono sviluppate;
- il metodo di compattazione dei provini;
- le prove eseguite per la caratterizzazione meccanica delle miscele.

in quasi tutte le procedure di mix design non è definita la determinazione della percentuale ottima di cemento.

In Italia il Ministero dei Lavori Pubblici (M.LL.PP.) all'Articolo (del "Capitolato speciale d'Appalto tipo per lavori stradali", prevede una procedura di mix design per la formazione di conglomerati bituminosi riciclati a freddo e definisce i criteri di qualificazione dei materiali costituenti. Negli Stati Uniti d'America ogni Stato confederato, che prevede l'uso del riciclaggio a freddo come tecnica per la formazione di conglomerati bituminosi, presenta una propria procedura di mi design. Accanto alle procedure previste dai singoli Enti Pubblici, si collocano le procedure previste da Società private, Enti gestori di tratte autostradali ed Università. Bisogna precisare che non sempre queste procedure sono di dominio pubblico, soprattutto nel caso di Società private.

4.1 Procedura del Ministero dei Lavori Pubblici

Secondo la procedura del M. LL.PP. la formulazione della miscela (granulometria del conglomerato da riciclare e degli inerti di integrazione, percentuale di emulsione bituminosa, di cemento e di acqua) deve essere ottenuta mediante uno specifico studio che prevede i passi riportati nei sottocapitoli successivi.

4.1.1. Campionamento e preparazione di campioni rappresentativi

4.1.1.1 Campionamento

Prelievi di materiale sciolto in sito (fresato) per la determinazione dell'umidità (CNR UNI 10008/63), della curva granulometrica (CNR 23/71) ante e post-estrazione del bitume, della percentuale di bitume (CNR 38/73) e delle caratteristiche del bitume estratto: penetrazione e punto di rammollimento (CNR 24/71, CNR 35/73).

4.1.1.2 Proporzionamento

Definizione della curva granulometrica di progetto con eventuale previsione di aggiunta di inerti.

Serie crivelli e setacci		Base	Binder
Crivello ¹	40	100	-
Crivello	25	80 – 100	100
Crivello	15	60 – 78	65 – 95
Crivello	10	48 – 64	50 – 70
Crivello	5	37 – 51	35 – 53
Setaccio	2	27 – 40	30 – 44
Setaccio	0,4	12 – 22	14 – 24
Setaccio	0,18	7 – 14	8 – 15
Setaccio	0,075	3 – 7	4 – 8

tab. 4.1 Fusi granulometrici di riferimento per Base e Binder

Si fa notare come l'attuale UNI EN 933-01 richiede l'utilizzo di soli setacci. Di seguito riportiamo la tabella per l'individuazione del Setaccio corrispondente ad un dato Crivello secondo l'esperienza di Feret (Lato = Diametro/1,25))

Crivello [mm]	Apertura Setaccio corrispondente [mm]	Setaccio	
		mm	inch
70	56	53,00	2,12"
40	32	31,50	1 1/4"
30	24	25,00	1"
25	20	20,00	3/4"
20	16	16,00	5/8"
15	12	12,50	1/2"
10	8	8,00	5/16"
5	4	4,00	n° 5

tab. 4.2 Corrispondenza crivelli-setacci secondo l'esperienza di Feret

4.1.2 Procedura di mix design

4.1.2.1 Determinazione della fase fluida ottima (OFC)

In questa fase si preparano campioni di miscela essiccata (granulometria di progetto) del peso di 1200 g (comprensivo di una percentuale di cemento pari a circa l'1%) con quantità crescenti di acqua dell'1.0% in peso. Con il materiale di ogni campione si confezionano provini seguendo la metodologia Marshall (CNR 30/73) o Duriez (CNR 130/89) riportate in tabella e si determina, mediante pesata idrostatica, la densità ottenuta per ogni provino. La costruzione della curva di densità consente di individuare la percentuale di acqua corrispondente alla massima densità.

MODALITA' DI PROVA		
	Metodo Marshall	Metodo Duriez
Altezza fustella	87,5 mm	275 mm
Diametro fustella	105 mm	120 mm
Peso materiale	1200 g	3500 g
Compattazione	120 daN/cm ²	120 daN/cm ²
Maturazione	1, 3, 7 giorni in stufa a T = 25°C	7, 14 giorni in stufa a T = 25°C
Rottura	Marshall a 25°C	A compressione a T = 25°C

tab. 4.3 Specifiche per prove Marshall e Duriez

4.1.2.2 Determinazione del contenuto ottimo di emulsione (OEC) e cemento

I campioni di miscela essiccata (granulometria di progetto) del peso di 1200 g si confezionano con quantità crescenti di emulsione bituminosa e cemento. La percentuale di umidità nell'impasto non deve mai superare quella misurata sulla curva di massima densità. Seguendo la metodologia Marshall si confezionano, per ogni livello di maturazione e per ogni diversa percentuale di cemento e di emulsione:

- n° 3 provini per la determinazione di densità e percentuale dei vuoti residui;
- n° 4 provini per la determinazione di stabilità, scorrimento e rigidità Marshall (CNR B.U. n°30/73);
- n° 12 provini per la determinazione della resistenza a trazione indiretta e dei parametri di deformabilità a 10°C, 25°C e 40°C da rilevare esclusivamente sull'ottimo di legante e di cemento.

In alternativa, con la metodologia Duriez si confezionano, per ogni livello di maturazione e per ogni diversa percentuale di cemento e di emulsione:

- n° 2 provini per la determinazione di densità e percentuale dei vuoti residui;
- n° 4 provini per la determinazione della resistenza a compressione;
- n° 12 provini per la determinazione della resistenza a trazione indiretta e dei parametri di deformabilità a 10°C, 25°C e 40°C da rilevare esclusivamente sull'ottimale di legante e di cemento;
- n° 4 provini per la determinazione del rapporto Immersione/Compressione (rottura a compressione dopo 7 giorni di immersione in acqua).

4.1.3 Specifiche materiali

Nell'Articolo 8 del Capitolato d'Appalto sono anche indicate le specifiche che i materiali costituenti la miscela devono avere.

4.1.3.1. Legante

Il legante finale deve essere costituito dal bitume presente nel conglomerato riciclato integrato con quello proveniente dall'emulsione bituminosa formulata con bitume modificato. L'emulsione per il riciclaggio a freddo deve rispondere alle caratteristiche indicate in tabella.

Emulsione bituminosa			
<i>Parametro</i>	<i>Normativa</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valori</i>
Contenuto d'acqua	CNR 101/84	%	40 ± 1%
Contenuto di legante	CNR 100/84	%	60 ± 1%
Contenuto di bitume	CNR 100/84	%	> 59%
Contenuto di flussante	CNR 100/84	%	0%
Demulsività	ASTM D244		0 – 40
Omogeneità	ASTM D244	%	< 0,2%
Viscosità Engler a 20°C	CNR 102/84	°E	5 – 10
Sedimentazione a 5 g	CNR124/88	%	< 10%
pH (grado di acidità)			2 – 4
Indice di rottura	NF-T 66-017		> 140
<i>Residuo bituminoso</i>			
Penetrazione a 25°C	CNR 24/71	dmm	50 – 70
Punto di rammollimento	CNR 35/73	°C	> 60
Punto di rottura Frass	CNR 43/74	°C	< -13
Ritorno elastico a 25°C	EN 13398	%	≥ 50

tab. 4.4 Caratteristiche emulsione bituminosa per riciclaggio a freddo

4.1.3.2 Conglomerato riciclato

Per conglomerato riciclato si intende il conglomerato proveniente dalla demolizione (anche parziale) di una pavimentazione in conglomerato bituminoso con idonee macchine fresatrici. Per lo strato di Base può essere utilizzato conglomerato riciclato di qualsiasi provenienza, mentre per il Binder materiale proveniente da vecchi strati di collegamento ed usura.

Prima del suo riutilizzo il conglomerato riciclato deve essere vagliato per eliminare eventuali elementi (grumi, placche, ecc.) di dimensioni superiori al D_{max} previsto per la miscela.

4.1.3.3 Inerti di integrazione

Secondo le prescrizioni di Capitolato, qualora la composizione granulometrica del materiale fresato non consenta la realizzazione della curva di progetto e/o il bitume nel conglomerato da riciclare sia maggiore del 5%, la miscela deve essere integrata con inerti nuovi.

Gli inerti di integrazione possono appartenere all'insieme degli aggregati grossi (trattenuti al crivello UNI n.5) o degli aggregati fini (passante al crivello UNI n. 5). Gli aggregati grossi potranno essere di provenienza o natura petrografica diversa perché, per ogni tipologia, risultino soddisfatti i requisiti indicati in tabella.

AGGREGATO GROSSO – Trattenuto al crivello UNI n. 5				
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione	
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base	Binder
Los Angeles	CNR 34/73	%	≤ 30	≤ 25
Micro Deval umida	CNR 109/85	%	≤ 20	≤ 20
Quantità di frantumato	-	%	100	100
Dimensione max	CNR 23/71	mm	40	30
Sensibilità al gelo	CNR 80/80	%	≤ 30	≤ 30
Spogliamento	CNR 138/92	%	≤ 5	≤ 5
Passante allo 0,075	CNR 75/80	%	≤ 1	≤ 1
Indice di appiattimento	CNR 95/84	%	≤ 30	≤ 25
Porosità	CNR 65/78	%		≤ 1,5

tab. 4.5 Caratteristiche aggregato grosso

Per gli aggregati fini le caratteristiche dovranno essere:

Indicatori di qualità			Strato pavimentazione	
<i>Parametro</i>	<i>Normativa</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Base</i>	<i>Binder</i>
Equivalente in sabbia	CNR 27/72	%	≥ 50	≥ 60
Indice di Plasticità	CNR-UNI 10014	%	N.P.	
Limite liquido	CNR-UNI 10014	%	≤ 25	
Passante allo 0,075	CNR 75/80	%		≤ 2
Quantità di frantumato	CNR 109/85	%		100

tab. 4.6 Caratteristiche aggregato fine

4.1.3.4 Cemento

Nel capitolato il cemento è da considerarsi un catalizzatore di processo per regolare i tempi di rottura dell'emulsione che divengono più o meno critici in relazione al tipo di applicazione. Si dovrà utilizzare cemento Portland d'alto forno o Pozzolatico (tipo I, III o IV) con classe di resistenza N 32,5 N/mm².

4.1.3.5 Acqua

Deve essere impiegata acqua pura ed esente da sostanze organiche (Ricordiamo che, per le specifiche dei materiali elencate nel capitolo, adesso si fa riferimento alle norme UNI EN)

4.2 Procedura Wirtgen

La procedura proposta dalla Wirtgen può essere considerata sia per il riciclaggio dei soli strati in conglomerato bituminoso, sia per la stabilizzazione di strati realizzati precedentemente con materiale sciolto. La procedura prevede quanto riportato nei sottocapitoli.

4.2.1 Campionamento e preparazione dei campioni

4.2.1.1 Campionamento in sito

Prelevare, durante le indagini sul campo e lo scavo dei pozzetti esplorativi, grandi quantità di campioni. Ogni strato della pavimentazione superiore (± 300 mm) deve essere campionato separatamente. Di ogni strato che probabilmente sarà incluso nella procedura di mix design sono necessari almeno 150 kg di materiale.

4.2.1.2 Preparazione dei campioni per la procedura di mix design

4.2.1.2.1 Prove geognostiche standard

Determinare la curva granulometrica (ASTM D 422) e l'indice di plasticità (ASTM D 4318) del materiale campionato da ogni singolo strato.

4.2.1.2.2 Miscelazione dei campioni

Se necessario, miscelare i materiali campionati dai vari strati per ottenere un campione combinato rappresentativo del materiale in tutta la profondità di riciclaggio. In sede di miscelazione dei materiali bisogna tenere conto della densità in sito e dello spessore. Ripetere l'analisi granulometrica e la determinazione dell'indice di plasticità per il campione miscelato.

4.2.1.2.3 Proporzionamento rappresentativo

Separare il materiale del campione rappresentativo nelle quattro frazioni seguenti:

- trattenuto al crivello da 19,0 mm;

- passante al crivello da 19,0 mm, ma trattenuto al crivello da 13,2 mm;
- passante al crivello da 13,2 mm, ma trattenuto al crivello da 4,75 mm;
- passante al crivello da 4,75 mm.

Ricostruire dei campioni conformi alla granulometria determinata dopo la miscelazione dei campioni fino alla frazione passante al crivello da 19,0 mm. Sostituire la frazione trattenuta al crivello da 13,2 mm.

4.2.1.2.4 Umidità igroscopica

Per determinare l'umidità igroscopica del materiale essiccato si usano due campioni rappresentativi essiccati all'aria, pesanti ognuno 1 kg circa. Pesare i campioni essiccati all'aria con un'accuratezza di 0,1 g e farli essiccare quindi in una stufa ad una temperatura compresa fra 105 e 110°C fino a che non avranno raggiunto una massa costante. L'umidità igroscopica è la perdita in massa espressa come percentuale della massa secca del campione.

4.2.2 Procedura di mix design

4.2.2.1 Requisiti del filler attivo

La stabilizzazione con leganti bituminosi deve essere eseguito normalmente in combinazione con una piccola quantità di un filler attivo (cemento o calce idrata). L'uso di filler è consigliato, ma talvolta è concesso l'utilizzo di polvere di frantoio (residui da frantoio < 6 mm) o materiale simile. Durante il processo di studio delle miscele si eseguono ulteriori prove senza filler attivo e/o con polvere di frantoio. I risultati di tali prove consentiranno di decidere se è opportuna l'aggiunta di un filler attivo o di polvere di frantoio.

4.2.2.2 Determinazione del contenuto ottimale di liquido (F_{opt}) e della densità massima del secco ($y_{s,max}$) del materiale trattato

Secondo la procedura Wirtgen il contenuto ottimale di liquido (F_{opt}) del materiale trattato con emulsione bituminosa equivale alla percentuale in massa dell'emulsione bituminosa più l'umidità aggiuntiva richiesta per conseguire, nel materiale trattato, la densità massima del secco. Il contenuto ottimale di liquido F_{opt} si determina aggiungendo una percentuale costante di emulsione bituminosa e variando opportunamente la quantità di acqua aggiunta.

In particolare si misura, per ogni campione preparato, l'emulsione bituminosa come percentuale in massa del materiale essiccato all'aria. La percentuale di emulsione bituminosa aggiunta è normalmente compresa fra il 2 e il 3% di bitume residuo (per ottenere ad es. il 3% di bitume residuo, aggiungere il 5% di un'emulsione bituminosa al 60% di bitume residuo).

Si aggiungono emulsione bituminosa ed acqua al materiale e si miscela il tutto fino ad ottenere un impasto omogeneo. Si costipano immediatamente i provini con un diametro di 150 mm. Il contenuto ottimale di liquido (F_{opt}), e la densità massima del secco ($Y_{s,max}$), per il materiale stabilizzato si determinano conformemente alla procedura di prova Proctor modificata per determinare il rapporto fra umidità e densità (AASHTO T-180)

4.2.2.3 Determinazione del contenuto ottimale di emulsione bituminosa (OEC)

Determinato il contenuto ottimo di liquido (F_{opt}) da introdurre nella miscela si passa alla determinazione del contenuto ottimo di emulsione bituminosa.

Il contenuto ottimale di emulsione bituminosa (OEC) si determina mantenendo costante il contenuto ottimo di liquido (F_{opt}) e variando opportunamente la quantità di emulsione bituminosa aggiunta.

La procedura proposta dalla Wirtgen prevede la preparazione di provini con diametro da 100 mm confezionati introducendo nella miscela diverse percentuali di emulsione bituminosa ed aggiungendo l'acqua necessaria a raggiungere il contenuto ottimo di

liquido (F_{opt}) precedentemente determinato. La procedura prevede che siano preparati provini con almeno quattro differenti percentuali di emulsione bituminosa. La compattazione dei provini deve essere effettuata secondo il metodo Marshall e la stagionatura prevista è di 72 ore a 40°C. Una volta terminata la stagionatura i provini dovranno essere lasciati raffreddare a temperatura ambiente.

Terminato il raffreddamento dei provini si potrà determinare la massa volumica apparente (Y_{app}) e li si potrà sottoporre al test di resistenza a trazione indiretta (R_t). Terminati i test su tutti i provini realizzati con le diverse percentuali di emulsione bituminosa, si potrà tracciare un grafico mettendo in relazione i valori di resistenza a trazione indiretta con le rispettive percentuali di emulsione bituminosa. Il contenuto ottimo di emulsione bituminosa sarà dato dai provini che manifestano la massima resistenza nella prova di trazione indiretta. Una volta determinato il contenuto ottimo di emulsione bituminosa, la procedura prevede la realizzazione di provini con diametro da 150 mm. Tali provini saranno preparati introducendo nella miscela il contenuto ottimo di liquido (F_{opt}) ed il solo contenuto ottimo di emulsione bituminosa (OEC). La compattazione deve essere realizzata secondo il metodo AASHTO T-180 modificata (Proctor modificata) e la stagionatura deve avvenire ponendo i provini per 48 ore a 40°C in contenitori di plastica ermetici sufficientemente capienti.

Terminata la stagionatura e raggiunta la temperatura ambiente, i provini così confezionati saranno utilizzati per condurre i seguenti test:

- determinazione della massa volumica apparente (Y_{app});
- resistenza a trazione indiretta (R_t);
- resistenza a compressione monoassiale (R_c);
- prove triassiali per la determinazione delle proprietà a taglio (cp,c):

Precisiamo che, sia per i provini con diametro da 100 mm. Sia per quelli con diametro da 150 mm. La valutazione della resistenza a trazione indiretta deve essere effettuata sia a secco (dopo stagionatura e raffreddamento), sia in condizioni umide (dopo stagionatura, raffreddamento ed immersione del provino per 24 ore in acqua a 25°C). il rapporto tra la resistenza a trazione indiretta a secco ed in condizioni umide restituisce il valore di resistenza a trazione residua (RTR):

$$RTR = R_t \text{ a umido} / R_t \text{ a secco} \times 100$$

4.3 Procedura Marshall-modificata

La procedura Marshall,sviluppata dal gruppo di lavoro n° 38 dell'AASHTO prevede,come le precedenti procedure, due fasi. A differenza delle precedenti, però, non si basa sul concetto di “fase fluida totale” (emulsione bituminosa più acqua), bensì distingue il contenuto ottimo di emulsione bituminosa (OEC) dal contenuto ottimo di acqua (OWC – Optimum Water Content). Per contenuto d’acqua si intende la somma delle percentuali in peso d’acqua proveniente dall’emulsione bituminosa, dal fresato e dell’acqua aggiunta all’atto della miscelazione per raggiungere il quantitativo totale voluto.

Un ulteriore differenza rispetto alle procedure viste in precedenza, consiste nella determinazione del contenuto ottimo di emulsione (OEC) che è sviluppata nella prima fase della procedura, mentre nelle precedenti l’OEC era determinato nella seconda fase.

4.3.1 Determinazione del contenuto ottimo di emulsione bituminosa (OEC)

Nel primo passo della procedura si pesa un quantitativo di RAP sufficiente a poter produrre almeno tre provini Marshall (D=101,6 ; H=62,5 mm) per ogni quantitativo di emulsione bituminosa. La procedura non specifica il numero minimo di contenuti di emulsione da considerare, ma definisce solo che lo scarto fra un quantitativo e l’altro di emulsione deve essere dello 0,5%.

Il materiale preparato è lasciato alla temperatura di realizzazione della miscela (25°C) per almeno un’ora.

Successivamente si aggiunge sufficiente acqua da poter raggiungere, insieme all’acqua proveniente dall’emulsione bituminosa, un contenuto totale pari al 3% rispetto al peso degli inerti. Mescolare per un minuto.

Introdotta, l’acqua, si aggiunge il quantitativo di emulsione bituminosa voluto e si mescola per non più di due minuti. Precisiamo che l’emulsione dovrà essere precedentemente riscaldata alla temperatura di 60°C.

Realizzata la miscela si passa alla compattazione dei provini con apparecchiatura Marshall applicando 50 colpi su ogni faccia, alla temperatura di 25°C. I provini realizzati sono fatti stagionare per sei ore a 60°C nella fustella di compattazione. Una volta realizzata la stagionatura i provini sono lasciati raffreddare per tutta la notte a temperatura ambiente e successivamente estrusi dalle fustelle. Completata la stagionatura i provini sono portati alla temperatura di 25°C per effettuare misure di densità e successivamente alla temperatura di 60°C per la misura della stabilità e dello scorrimento Marshall. La procedura non definisce in modo preciso se la scelta dell'OEC dipende dai valori di densità o dai risultati della prove Marshall.

4.3.2 Determinazione del contenuto ottimo di acqua (OWC)

Determinato il contenuto ottimo di emulsione bituminosa (OEC), si passa alla determinazione del contenuto ottimo di acqua (OWC). Mantenendo costante il quantitativo di emulsione introdotto, e dunque l'acqua proveniente da essa, si aggiunge acqua in modo tale da raggiungere percentuali di umidità totale che si assestino intorno al 3% della prima fase, con scarti dello 0,5% (Ad esempio 2 – 2,5 – 3,5 – 4% di umidità totale).

Le modalità di realizzazione della miscela, la compattazione dei provini e lo modalità di verifica delle prestazioni risultano invariate rispetto alla fase precedente.

Nella procedura è suggerito di scegliere l'OEC e l'OWC in modo tale da avere una miscela con una percentuale di vuoti tra il 9 ed il 14%:

4.4 Procedura Superpave (Università di Rhode Island)

La procedura proposta dall'Università di Rhode Island risulta la più esplicita in termini di scelta delle variabili da considerare e di operazioni da seguire per determinare le quantità ottime per ogni singolo componente della miscela. L'obiettivo è stato quello di sviluppare una procedura di mix design che si basasse sul metodo Superpave usato per il mix design di conglomerati bituminosi confezionati a caldo.

La prima fase è caratterizzata dallo studio delle diverse procedure di mix design presenti negli Stati Uniti d'America. Tra le procedure analizzate la più accreditata è risultata essere la procedura Marshall-modificata e su di essa è concentrata l'attenzione al fine di sviluppare la nuova procedura.

Individuata la procedura di riferimento è stato condotto uno studio pilota che ha permesso di caratterizzare il comportamento del RAP sottoposto a compattazione con Pressa Giratoria.

Successivamente è stato sviluppato un programma sperimentale al fine di definire l'influenza delle diverse variabili (contenuto di emulsione bituminosa, contenuto totale di fluido, tempi e temperature di maturazione) sul raggiungimento di una certa densità da parte della miscela.

Infine è descritta la procedura di mix design basata sul metodo Superpave.

4.4.1 Studio pilota

Individuata la procedura di riferimento, è stato effettuato uno studio pilota che aveva come scopo quello di stabilire il comportamento del RAP sottoposto a compattazione con Pressa Giratoria. In questo studio la procedura Marshall-modificata è stata applicata con alcune rettifiche riguardanti l'attrezzatura di compattazione e il valore di riferimento per l'individuazione dell'ottimo delle singole componenti (emulsione bituminosa ed acqua). In particolare la procedura Marshall-modificata è stata applicata utilizzando come attrezzatura di compattazione la Pressa Giratoria e come valore di riferimento l'11% di vuoti (valore medio del range 9 – 14% suggerito nella procedura Marshall-modificata). Nell'utilizzare la Pressa Giratoria per la compattazione di provini con diametro da 150 mm, sono stati impostati i seguenti parametri:

- carico: 600 kPa;
- angolo di inclinazione: 1,25°;
- numero di giri: 52.

Come si nota, l'unico parametro ad essere stato cambiato rispetto alla compattazione di conglomerati confezionati a caldo, risulta essere il numero di giri, che, da 100 è stato ridotto a 52.

Definiti i parametri della Pressa Giratoria è stata applicata la procedura Marshall-modificata su tre campioni di RAP derivanti da tre strade differenti (Kansas, Ontario e Connecticut).

Per ogni campione di RAP, al termine della procedura, sono stati individuati l'OEC e l'OWC come segue:

- si è osservato, per ogni contenuto di emulsione o di acqua, il numero di giri necessario ad ottenere una percentuale di vuoti il più vicino possibile all'11%.
- individuato il numero di giri che restituisce, in media, una miscela con l'11% di vuoti si sono osservati i valori di densità ottenuti.
- l'OEC e l'OWC saranno quelle percentuali che, al numero di giri necessario per avere l'11% di vuoti, restituiscono la massima densità all'interno della miscela.

Attraverso questo studio pilota l'Università del Rhode Island ha potuto individuare, per ognuno dei tre campioni di RAP, il numero di giri necessari ad ottenere una miscela con l'11% di vuoti (come suggerito dalla procedura Marshall-modificata) e la densità massima raggiungibile con l'ottimo di emulsione ed acqua.

4.4.2 Programma sperimentale

Realizzato lo studio pilota, necessario a definire l'azione di compattazione della Pressa Giratoria sul RAP, è stato sviluppato un programma sperimentale, basato anch'esso sulla procedura Marshall-modificata, per individuare l'influenza delle diverse variabili nell'ottimizzazione della miscela. Le variabili considerate all'interno del programma sperimentale sono le seguenti:

- contenuto di emulsione bituminosa;
- contenuto totale di fluido (FC – Fluid Content);
- tempo di maturazione;
- temperatura di maturazione.

Per poter individuare l'influenza che ogni singola variabile può avere nella realizzazione della miscela, è stato scelto come valore di riferimento la densità. In particolare, il valore di "densità obiettivo" è stato posto pari a 2082 kg/m^3 (130 pound/cubic foot), ovvero la densità registrata su una carota prelevata da una pavimentazione precedentemente riciclata a freddo.

Definito il valore di “densità obiettivo”, il programma sperimentale è stato sviluppato utilizzando un campione di RAP analizzato nello studio pilota (Conneticut) . Per tale campione, il numero di giri necessario a raggiungere la “densità obiettivo” è pari a 37. Individuata la densità di riferimento (2082 kg/m^3) e determinato il numero di giri necessario a raggiungerla, per ogni variabile sono stati scelti i valori da prendere in considerazione.

Per il contenuto di emulsione bituminosa sono state scelte 4 percentuali (0,5 , 1 , 1,5 e 2%) che avessero come valor medio l’OEC (1,2%) determinato nello studio pilota per lo stesso tipo di RAP. Nel programma sperimentale, la procedura Marshall-modificata è stata cambiata nuovamente, basando la seconda fase non sulla determinazione del contenuto ottimo di acqua (OWC), ma sulla determinazione del contenuto ottimo di fluido totale (OEC). Per il contenuto fluido totale sono state considerate due percentuali (3,5 e 4%). La prima nasce dalla somma del contenuto ottimo di emulsione ed acqua determinati nello studio pilota per lo stesso tipo di RAP (1,2% OEC + 2,3% OWC), mentre la seconda è stata scelta sulla base dei valori che solitamente si hanno in sito. I tempi di maturazione considerati sono di 6 e 24 ore. Il primo tende a simulare le condizioni della miscela dopo la stesa e la compattazione, mentre il secondo le condizioni della miscela poco prima della stesa degli strati superiori realizzati a caldo. Infine, le temperature di maturazione prese in considerazione sono di 25 e 60°C. Entrambe le temperature si riferiscono alla stagione estiva, rispettivamente alle temperature della pavimentazione di notte e di giorno.

Applicata la procedura Marshall-modificata , i valori di densità sono stati registrati in due tempi differenti:

- due ore dopo il termine della maturazione;
- una settimana dopo il termine della maturazione:

I valori di densità ottenuti a due ore e ad una settimana, sono stati soggetti ad analisi statistica e a considerazioni pratiche che hanno portato alle seguenti conclusioni:

- i valori di densità risultano più attendibili dopo una settimana dal termine della maturazione. Ciò è dovuto al fatto che l’eventuale acqua in eccesso, ancora presente all’interno del provino, ha la possibilità di evaporare.
- la maturazione deve essere di 24 ore a 60°C. Infatti una temperatura maggiore e tempi più lunghi permettono di eliminare più facilmente l’acqua in eccesso.

- al variare del RAP il numero di giri da applicare deve essere corretto al fine di ottenere una densità quanto più simile a quella prevista in sito.

4.4.3 Procedura di mix design

La procedura è applicabile solo su miscele contenenti RAP ed emulsione bituminosa ed è caratterizzata da due fasi:

- determinazione del contenuto ottimo di emulsione bituminosa (OEC);
- determinazione del contenuto ottimo di acqua (OWC):

4.4.3.1 Preparazione del RAP

Il RAP utilizzato per la procedura di mix design deve essere ricavato dalla pavimentazione che sarà soggetta al processo di riciclaggio a freddo e dovrà essere rappresentativo di tutta la profondità di riciclaggio.

Essiccare una porzione di RAP prelevato in sito alla temperatura di 110 al fine di determinare la percentuale di umidità presente. Essiccare la restante parte del campione di RAP ad una temperatura di 60°C per rimuovere l'umidità esistente.

Definire la curva granulometrica del RAP secondo il metodo Superpave utilizzando i seguenti setacci:

31,75 mm
25,0 mm
19,1 mm
12,5 mm
9,5 mm
4,75 mm
2,36 mm
1,18 mm
< 1,18 mm

tab. 4.7 Dimensione dei setacci nel metodo Superpave

4.4.3.2 Temperatura di realizzazione miscela e di compattazione

La temperatura del RAP e dell'acqua all'atto della realizzazione della miscela deve essere di 25°C.

La temperatura dell'emulsione bituminosa deve essere quella suggerita dal produttore.

La temperatura a cui avviene la compattazione deve essere di 25°C:

4.4.3.3 Preparazione della miscela

La prima parte della procedura prevede la determinazione del contenuto ottimo di emulsione mantenendo il contenuto d'acqua costante del 3%. Le percentuali di emulsione bituminosa da considerare devono essere non meno di quattro e per ogni percentuale di emulsione considerata devono essere preparati almeno due provini. In più, per ogni percentuale di emulsione, dovrà essere preparato un provino per la determinazione della massima densità teorica.

Pesare, in contenitori singoli, un quantitativo di RAP (4 kg per ogni provino) precedentemente proporzionato secondo il fuso granulometrico definito dal Superpave. Tale RAP sarà utilizzato per confezionare provini con 150 mm di diametro e 115 mm di altezza.

Lasciare il RAP per almeno un'ora alla temperatura di 25°C e contemporaneamente riscaldare l'emulsione bituminosa alla temperatura suggerita dal produttore. Aggiungere l'acqua necessaria a raggiungere il 3% di umidità (solo acqua) e mescolare per non più di un minuto.

Aggiungere il contenuto di emulsione voluto e mescolare fino a disperderla uniformemente, ma per non più di un minuto. Nel caso in cui dopo un minuto l'emulsione non risulta dispersa uniformemente nella miscela si può aggiungere dell'acqua.

4.4.3.4 Compattazione dei provini

Realizzata la miscela porla immediatamente all'interno della fustella di compattazione della Pressa Giratoria ed eseguire la compattazione secondo i seguenti parametri:

- carico : 600 kPa;
- angolo di inclinazione: 1,25°;
- numero di giri: da determinare sulla base della densità di progetto.

Terminata la compattazione rimuovere immediatamente i provini della fustella. Far maturare i provini per 24 ore a 60°C e successivamente lasciarli raffreddare a temperatura ambiente.

4.4.3.5 Determinazione della densità

Effettuare per ogni contenuto di emulsione, almeno una prova di determinazione della densità attraverso pesata idrostatica. Tale valore di densità verrà utilizzato per effettuare la correzione dei valori di densità stimati dalla Pressa Giratoria ad ogni giro.

4.4.3.6 Determinazione del contenuto ottimo di emulsione (OEC)

Tracciare, su grafici separati, i valori di densità e percentuale dei vuoti in funzione delle percentuali di emulsione considerate.

L'OEC sarà dato dal contenuto di emulsione che restituisce il massimo valore di densità.

4.4.3.7 Determinazione del contenuto ottimo di acqua (OWC)

Il contenuto ottimo di acqua dovrà essere determinato seguendo le stesse operazioni descritte in precedenza. Le percentuali d'acqua da considerare dovranno essere almeno quattro (due superiori e due inferiori rispetto alla percentuale della prima fase e con scarti dello 0,5%) ed i provini da realizzare dovranno essere almeno due per ogni percentuale d'acqua introdotta.

Tracciare, su grafici separati, i valori di densità e percentuale di vuoti in funzione delle percentuali di acqua considerate.

L'OWC sarà dato dal contenuto di acqua che restituisce la massima densità.

Nel caso in cui l'OWC si discosti più dell'1% rispetto alla percentuale iniziale, allora sarà necessario determinare nuovamente l'OEC introducendo nella miscela l'OWC appena trovato. Se l'OEC rimarrà invariato, allora la procedura potrà considerarsi conclusa, altrimenti sarà necessario proseguire fino alla determinazione del nuovo OWC.

$$RTR = R_{t,secco} / R_{t,umido}$$

4.4.3.8 Determinazione della sensibilità all'acqua

Determinati l'OEC ed l'OWC, preparare sei provini al fine di verificare la sensibilità all'acqua attraverso il valore di resistenza a trazione residua (RTR) dato dal rapporto tra resistenza a trazione indiretta in condizioni secche ed umide (AASHTOT283).

Capitolo 5

Leganti e loro impiego

5.1 Tipi di leganti

5.1.1 Generalità

I leganti attualmente utilizzati in tutto il mondo sono innumerevoli. La gamma comprende composti chimici come il cloruro di calcio, polimeri a catena lunga e prodotti solfonati di petrolio, altri prodotti brevettati e i leganti più tradizionali come il cemento e il bitume. Tutti i leganti mirano a raggiungere lo stesso obiettivo: legare insieme le singole particelle degli aggregati per aumentare la resistenza meccanica e/o la resistenza all'acqua del materiale. Alcuni sono più efficaci di altri se impiegati con determinati materiali, altri ancora sono più convenienti sotto l'aspetto economico; tutti però si sono

ritagliati il loro spazio sul mercato, e la maggior parte di essi trova la sua migliore applicazione negli interventi eseguiti con moderne macchine riciclatrici.

Oggi giorno vengono continuamente messi a punto nuovi prodotti ed è importante per il settore che essi siano, giustamente, messi alla prova. Le novità dovrebbero essere sempre promosse, in quanto nessun singolo legante può rappresentare la soluzione ottimale per tutte le applicazioni. Gli ingegneri che si trovano a dover decidere quale legante impiegare per un determinato progetto devono avere un approccio di larghe vedute. Le scelte di tale tipo sono generalmente influenzate, in ordine d'importanza, dai fattori qui di seguito riportati:

- prezzo. Il costo unitario della stabilizzazione (normalmente espresso in termini di costo al metro quadrato di strato completato) sarà sempre il fattore principale;
- reperibilità. Certi leganti potrebbero non essere disponibili ovunque. Le emulsioni bituminose, per esempio, in alcuni Paesi non vengono prodotte;
- caratteristiche del materiale. Alcuni leganti sono più efficaci di altri, se utilizzati con determinati materiali. La calce, ad esempio, andrebbe usata in luogo della stabilizzazione a cemento nei terreni caratterizzati da un'alta plasticità ($IP > 10$);
- scelte politiche. Le politiche rigorose di taluni enti gestori delle strade, in riferimento all'uso di certi leganti, sono spesso influenzate da esperienze acquisite nel passato.

L'approccio adottato nei confronti dei leganti varia da Paese a Paese e da un ente gestore all'altro. Quando queste divergenze sono dettate dalla politica, spesso nascono piuttosto da convinzioni erranee che non per merito di solide caratteristiche tecniche. La tecnologia non conosce confini: è possibile confrontare le caratteristiche di resistenza rilevate in qualsiasi parte del mondo, a condizione che i materiali siano simili e che si adottino gli stessi criteri di prova. Non esiste, quindi, alcuna ragione valida per scartare un determinato legante quando esso risponde a tutti i requisiti tecnici rilevanti.

Da parte loro, gli ingegneri tendono per natura ad essere prudenti. Loro, infatti, operano alle frontiere della tecnologia e possono trovarsi a vivere esperienze rischiose e solitarie; per questa ragione, spesso preferiscono adottare tecniche già sperimentate e collaudate. I leganti cementizi sono stati studiati a fondo, e in parte anche i loro parenti bituminosi. Ne viene fatto un largo impiego e metodi di prova standardizzati permettono di determinare sia le miscele ottimali sia i requisiti di

assicurazione della qualità. Inoltre, sia il cemento che il bitume sono largamente usati nel settore delle costruzioni e sono generalmente disponibili in tutto il mondo. Pertanto non stupisce che siano i leganti più comunemente utilizzati.

Il comportamento dei materiali non legati (non stabilizzati) nelle pavimentazioni flessibili dipende dalle sollecitazioni cui essi sono sottoposti. Ciò significa che, se confinate in uno strato della pavimentazione, le caratteristiche di rigidità effettive aumentano con il crescere del carico. Quando i materiali sono sottoposti ripetutamente a livelli di sollecitazione che eccedono la loro resistenza massima, si verificano deformazioni a taglio che portano all'ormaiamento. L'aggiunta di un legante lega insieme le particelle del materiale modificandone il comportamento sotto carico in modo tale che lo strato in materiale legato reagisca piuttosto come una soletta, presentando schemi delle sollecitazioni totalmente differenti.

I leganti cementizi promuovono la rigidità, mentre i leganti bituminosi tendono a rendere un materiale relativamente flessibile.

Il materiale cementato ha una tendenza al ritiro, che nello strato sottoposto a carichi ripetuti si manifesta sotto forma di fessurazione a blocchi. I materiali legati con bitume, invece, sono relativamente morbidi, presentano proprietà elastiche migliori e tendono a deformarsi sotto carico. Si sviluppano tuttavia sollecitazioni di trazione nella porzione inferiore di tutti gli strati costruiti in materiale legato quando la pavimentazione si deflette sotto carico. I carichi ripetuti (misurati normalmente in milioni di ripetizioni) causano la rottura a fatica del materiale (fessure che si propagano dal basso verso l'alto). Il tipo di legante utilizzato è uno dei principali fattori che determinano il numero di ripetizioni del carico che uno strato può sopportare prima che si manifesti una fessurazione di tale genere.

5.1.2 Leganti cementizi

La calce, il cemento e i composti ottenuti miscelando tali prodotti con ceneri volanti, scorie d'altoforno frantumate e altri materiali pozzolanici rappresentano i leganti maggiormente utilizzati. La funzione principale dei leganti cementizi è quella di aumentare la capacità portante. Inoltre la calce rilasciata durante il processo d'idratazione, reagendo con le particelle d'argilla presenti in un terreno plastico, ne

riduce la plasticità. L'uso di miscele di cemento andrebbe però limitato al trattamento di materiali con un indice di plasticità inferiore a 10. La calce resta il miglior legante per i materiali caratterizzati da maggiore plasticità.

La resistenza conseguita dipende dalla quantità di legante aggiunta e dal tipo di materiale trattato. Contrariamente a quanto alcuni ritengono, l'aggiunta di più cemento allo scopo di ottenere maggiori valori di resistenza può essere pregiudizievole per le prestazioni dello strato. Il materiale trattato con un legante cementizio tende ad essere mediamente friabile. Aumentare la resistenza del materiale significa renderlo ancora più friabile, con conseguente riduzione della flessibilità dello strato stabilizzato.

In tale situazione, le continue sollecitazioni indotte dai carichi del traffico (specialmente quello dei mezzi pesanti) comporteranno inevitabilmente un aumento delle fessurazioni, accompagnato da un degrado delle prestazioni strutturali. È quindi fondamentale che i requisiti prestazionali dello strato stabilizzato siano chiaramente definiti e che venga condotto uno studio adeguato delle miscele su campioni rappresentativi allo scopo di determinare la giusta quantità di legante da aggiungere.

5.1.3 Leganti bituminosi

L'uso del bitume come legante, impiegato sia sotto forma di emulsione sia come bitume schiumato, sta diventando sempre più diffuso, principalmente grazie ai progressi compiuti in campo tecnologico. Il trattamento di un materiale con un bitume liquido non è un processo di stabilizzazione dal momento che il bitume si disperde in maniera simile a quella di un conglomerato bituminoso a freddo. Tale trattamento è stato vietato per motivi ambientali nella maggior parte dei Paesi, e quindi non verrà contemplato.

La stabilizzazione con bitume è un metodo conveniente per aumentare la resistenza di un materiale riducendo al tempo stesso l'azione deleteria dell'acqua. La stabilizzazione a bitume consente di ottenere uno strato relativamente flessibile rispetto allo stesso materiale trattato con cemento. Il materiale stabilizzato con bitume e una percentuale di cemento inferiore all'1,5% (in massa) non è soggetto al fenomeno della fessurazione da ritiro, tipico dei materiali trattati con cemento. La superficie realizzata con materiale stabilizzato a bitume può essere immediatamente aperta al traffico, grazie al legame iniziale (resistenza) delle particelle in superficie che ne impediscono lo sgranamento sotto

l'azione del traffico. Tuttavia, finché durante il processo di asciugatura continua ad aumentare la resistenza del materiale, è buona norma non parcheggiare veicoli pesanti, tra cui rientrano anche i rulli compattatori, sullo strato completato.

È importante distinguere fra due tipologie di trattamento, fra loro molto differenti, che possono essere eseguite usando emulsioni bituminose:

- un processo di ringiovanimento in conformità ai principi della tecnologia dei conglomerati bituminosi a caldo. In linea di massima, l'applicazione di un'emulsione bituminosa appositamente formulata sul RAP rammollisce il bitume invecchiato che riveste i singoli granuli dell'aggregato, permettendo di stendere e costipare la miscela come un conglomerato a freddo. I criteri di progetto per un tale processo sono essenzialmente gli stessi di quelli adottati per un conglomerato bituminoso a caldo. Di conseguenza gli studi di mix design sono condotti o usando il tradizionale metodo Marshall (con provini aventi 100 mm di diametro) oppure con i più recenti metodi SHRP con compattazione giratoria;
- un processo di stabilizzazione in conformità alla tecnologia applicabile anche ai materiali granulari non legati. I provini sono confezionati secondo il metodo di costipamento Proctor e tutte le procedure di mix design usano proprietà di resistenza per determinare il corretto dosaggio dell'emulsione. Trattandosi essenzialmente di un materiale granulare "migliorato", gli strati di pavimentazione costruiti con materiali stabilizzati a bitume hanno sempre uno spessore maggiore di 100 mm.

Il riciclaggio con un legante bituminoso (al contrario di un agente rigenerante) crea un materiale stabilizzato a bitume e non uno dall'aspetto simile all'asfalto. Uno strato di base in conglomerato bituminoso a granulometria continua ha di norma una percentuale di vuoti compresa fra il 3 e il 6%, e ogni granulo è avvolto da una sottile pellicola di bitume agente come "adesivo a contatto". Un materiale stabilizzato a bitume è caratterizzato dal fatto che il bitume si disperde principalmente fra le particelle fini, tipicamente la frazione con diametro dei grani inferiore a 0,075 mm per il bitume schiumato e un po' più grossa per l'emulsione bituminosa. Si tratta pertanto di un materiale granulare con un mastice ricco di bitume. La vera percentuale dei vuoti di un tale materiale dopo costipamento è raramente minore del 10% e sotto carico esso tende a comportarsi in parte come

un materiale granulare, in grado di sopportare le sollecitazioni di rottura a compressione dovute all'attrito intergranulare, e in parte come un materiale viscoelastico capace di sopportare ripetute sollecitazioni di trazione. Si tratta quindi di un ibrido.

Alcuni materiali di secondaria importanza, trattati con un legante bituminoso, presentano scarse proprietà di conservazione della resistenza (per esempio, perdono resistenza se immersi in acqua). A ciò è possibile ovviare aggiungendo un "filler attivo" come la calce idrata o il cemento. Piccole quantità di un filler attivo (dallo 0,5 all'1,5% in massa) possono aumentare in misura significativa la capacità di conservazione della resistenza, senza pregiudicare le proprietà a fatica dello strato. Un filler attivo agisce come un catalizzatore di dispersione nel bitume schiumato, e se usato con un'emulsione bituminosa ne promuove la rottura. È quindi consuetudine utilizzare il cemento o la calce idrata insieme ai leganti bituminosi.

Fattore	Emulsione bituminosa	Bitume schiumato	Conglom. bituminoso a caldo
Tipi di aggregati applicabili	<ul style="list-style-type: none"> - aggregati lapidei frantumati - ghiaia naturale - RAP, conglomerato a freddo - RAP stabilizzato 	<ul style="list-style-type: none"> - aggregati lapidei frantumati - ghiaia naturale - RAP stabilizzato - di qualità scadente (sabbie) 	<ul style="list-style-type: none"> - Gebrochenes Gestein - 0 % - 50 % Fräsesphalt
Temperatura di miscelazione del bitume	20 °C - 70 °C	160 °C - 180 °C (prima della schiumatura)	140 °C - 180 °C
Temperatura degli aggregati all'atto della miscelazione	temperatura ambiente (a freddo)	temperatura ambiente (a freddo)	Nur heiß (140 °C - 200 °C)
Contenuto di umidità durante la miscelazione	90% di w_{opt} meno il 50% del contenuto di emulsione	inferiore a w_{opt} , ad es. 65% - 95% di w_{opt}	asciutto
Rivestimento degli aggregati	rivestimento parziale dei granuli grossi e coesione della miscela con la malta di bitume/filler	rivestimento dei soli granuli fini con "saldatura a punti" della miscela ad opera della malta di bitume/filler	rivestimento di tutti i granuli degli aggregati con una pellicola di spessore controllato
Temperatura all'atto della stesa e del costipamento	temperatura ambiente	temperatura ambiente	140 °C - 160 °C
Velocità di aumento della resistenza iniziale	lenta	media	rapida
Modificazione del legante	si	inidoneo	si
Parametri importanti del legante	<ul style="list-style-type: none"> - tipo di emulsione (anionica, cationica) - bitume residuo - tempo di rottura - presa 	<ul style="list-style-type: none"> - tempo di dimezzamento - rapporto di espansione 	<ul style="list-style-type: none"> - penetrazione - punto di rammollimento - viscosità

tab.5.1 Confronto fra i vari tipi di applicazione del bitume

5.2 Stabilizzazione con bitume

Nell'industria delle costruzioni stradali il bitume è usato in varie forme come legante. A temperatura ambiente il bitume è un liquido molto viscoso non lavorabile. In generale esistono quattro modi per rendere il bitume lavorabile:

- uso del calore (aumento della temperatura);
- miscelazione con solventi di petrolio (in modo da ottenere bitume liquido o flussato);
- emulsione in acqua per ottenere un'emulsione bituminosa;
- produzione di bitume schiumato in uno stato temporaneo di bassa viscosità.

I primi due metodi su elencati non sono applicabili al riciclaggio a freddo: il primo è il processo di confezionamento del conglomerato bituminoso a caldo, che richiede il preriscaldamento e l'essiccazione degli aggregati. Il secondo utilizza solventi che oltre ad essere costosi sono sostanze inquinanti pericolose e quindi indesiderate. I paragrafi che seguono saranno focalizzati sull'emulsione bituminosa e sul bitume schiumato, che sono gli unici due leganti bituminosi utilizzabili.

5.2.1 Le emulsioni bituminose

L'emulsione bituminosa, insieme all'acqua, è una delle componenti della fase fluida introdotta nella miscela. L'emulsione bituminosa è una dispersione di bitume in acqua. Per disperdere il bitume è necessario utilizzare energia meccanica di taglio e un agente tensioattivo o emulsionante.

Scientificamente, una emulsione è un sistema eterogeneo termodinamicamente instabile, che include almeno due fasi, delle quali una (il bitume) è dispersa nell'altra (acqua) sotto forma di goccioline. Un tale sistema possiede una sua stabilità minima che può essere aumentata mediante l'aggiunta di appropriati agenti tensioattivi che abbassano la tensione superficiale o interfacciale tra le due fasi, favorendo la dispersione. In altre parole, un'emulsione bituminosa, oltre alle due fasi principali (acqua e bitume), deve contenere degli agenti adeguati, destinati a favorirne il mantenimento dell'equilibrio.

5.2.1.1 Componenti

5.2.1.1.1 Bitume

I leganti di base utilizzati per la fabbricazione delle emulsioni bituminose ed impiegati per la costruzione e la manutenzione delle pavimentazioni stradali, sono “bitumi puri” o “bitumi modificati con polimeri”, eventualmente fluidificati o flussati. Il bitume è un prodotto petrolifero proveniente dalla raffinazione del greggio, dotato di proprietà leganti, impermeabilizzanti e resistente alla maggior parte degli acidi, dei Sali e degli alcali. La qualità del bitume in commercio dipende dal greggio d’origine e dal processo che esso subisce in raffineria. Il bitume, le cui specifiche tecniche sono riportate nella norma EN-12591, viene prodotto in diverse gradazioni, differenziabili attraverso la prova di penetrazione.

Per la produzione di emulsioni, in passato si preferiva utilizzare bitume ad alta penetrazione e quindi piuttosto tenero (160/220 dmm), oggi invece si riesce ad emulsionare bitume a qualsiasi gradazione, comprese quelle più dure (20/30 dmm). Qualche volta, in raffineria, viene incorporato un additivo acidificante che facilita la “messa in emulsione” del bitume (bitume emulsionabile). Il contenuto di bitume in un’emulsione può variare dal 50 al 70%. In Italia, esiste un limite fiscale che impone una quota massima del 69%.

5.2.1.1.2 Acqua

L’acqua scelta non deve contenere né impurità organiche (sospensioni colloidali) né minerali. Per la produzione delle emulsioni, in generale si utilizza acqua di pozzo o di acquedotto.

5.2.1.1.3 Fluidificanti (o flussanti)

In passato venivano impiegati oli di catrame di carbon fossile. Attualmente, per la loro classificazione come sostanze pericolose, tali prodotti sono stati bnditi dal mercato e non possono assolutamente essere utilizzati. Vengono invece utilizzati prodotti oleosi a bassa viscosità. I fluidificanti vengono eventualmente aggiunti al bitume.

5.2.1.1.4 Emulsionanti (o tensioattivi)

Sono prodotti chimici classificabili in base al loro comportamento di dissociazione in acqua che, prima favoriscono la dispersione del bitume in acqua, poi, dopo la rottura, favoriscono l'adesione del bitume agli inerti. In particolare, si caratterizzano per la loro consistenza liquida o pastosa che ne condiziona la manipolazione, lo stoccaggio ed il dosaggio. Essi sono costituiti da molecole caratterizzate dalla presenza di due sezioni o "gruppi" con affinità opposte:

- un gruppo polare (COO^- oppure NH_3^+) che gli conferisce proprietà *idrofile* (affinità chimica con l'acqua);
- una catena idrocarburica apolare $\text{R} = \text{CH}_3(\text{CH}_2)_n$ che gli conferisce proprietà *lipofile* (affinità con i grassi ovvero con il bitume).

Essi si distinguono in:

- emulsionanti Anionici – saponi di acidi grassi: caratterizzati dalla parte polare caricata negativamente;
- emulsionanti Cationici – ammine (non aromatiche) o sali di ammonio: caratterizzati dalla parte polare caricata positivamente $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n \text{NH}_3^+$ (Cl).

Poiché gli emulsionanti sono insolubili in acqua è indispensabile trasformarli in "saponi" per permetterne lo scioglimento nella fase disperdente. A tale scopo si fanno reagire o con acido cloridrico (in concentrazione 32%) nel caso delle emulsioni acide o con soda (NaOH) per quelle basiche.

5.2.1.2 Classificazione delle emulsioni bituminose

Non esiste un principio unico, riconosciuto da tutti, per la classificazione delle emulsioni. Quello comunemente più accettato definisce una emulsione utilizzando i parametri relativi al carattere ionico, alla velocità di rottura e al quantitativo di bitume residuo.

5.2.1.2.1 Classificazione secondo il carattere ionico

I tensioattivi introdotti si possono raggruppare in anionici o cationici, in relazione alla carica elettrica che conferiscono ai globuli di bitume, per cui parleremo di:

- emulsioni bituminose anioniche (basiche) con carica negativa (-);
- emulsioni bituminose cationiche (acide) con carica positiva (+).

5.2.1.2.2 Classificazione secondo la percentuale di bitume residuo

Il rapporto volumetrico percentuale del bitume disperso (che rappresenta anche la concentrazione della “fase utile”) sul volume totale è molto usato in campo stradale. Troveremo in commercio emulsioni con *bitume residuo* al 50%-55%-60%-65% 69%

5.2.1.2.3 Classificazione secondo la velocità di rottura

“Rottura” è il termine che si usa per indicare il momento in cui l’acqua si separa dal bitume ed inizia il fenomeno di presa.

Calcolare il momento in cui questa separazione deve avvenire è molto importante, ma dipende da tanti fattori: l’andamento climatico, la temperatura dell’emulsione, la natura chimica degli inerti, la granulometria dei globuli di bitume, il tipo di applicazione, le modalità esecutive del lavoro ecc. Non esiste perciò un “tempo” in valore assoluto .

Con riferimento alla velocità di rottura, si parlerà di:

- emulsione rapida (R);

- emulsione media (M);
- emulsione lenta (L);

ma anche di:

- emulsione super rapida (RR);
- emulsione sovrastabilizzata (LL).

In relazione a quanto sopra esposto, quando scriviamo ad esempio, EC R 69, indichiamo una Emulsione Cationica, con velocità di rottura Rapida, al 69% di bitume residuo. Se il bitume è modificato si aggiunge una M finale: EC R 69 M.

In ambito CEN (Comitato Europeo di Normazione), il gruppo di lavoro n° 2 /WG2) del TC 336, ha proceduto all'armonizzazione delle specifiche tecniche relative alle emulsioni bituminose (Norma EN-138°8, "Framework for specifying cationic bituminous emulsions" approvata nel maggio 2005).

La Norma prevede tre tabelle distinte:

- la prima è relativa alle caratteristiche delle emulsioni;
- la seconda a quelle del bitume estratto per evaporazione;
- la terza a quelle del bitume invecchiato.

Il documento di lavoro, però, riguarda le sole emulsioni cationiche (indicate sempre con la lettera C) e, oltre ad una diversa nomenclatura, prevede alcune particolarità. Per esempio, la lettera B indica una emulsione prodotta con bitume stradale tradizionale (bitume da distillazione puro, cioè senza modifica o aggiunta di additivi). Se utilizziamo un bitume modificato in emulsione, si dovrà invece indicarlo con la sigla BP Bitume Polimero).

La lettera F indica, invece, la presenza di un "flussante" in quantitativo apprezzabile (superiore al 2% in peso sul bitume). L'eventuale presenza di un flussante in quantitativo inferiore al 2% non va indicata e si mantiene la lettera B.

La velocità di rottura è indicata invece in funzione dell'appartenenza ad una classe, in una serie compresa tra 2 e 6. Le classi 2 e 3 sono tipiche di una emulsione a rapida rottura, le classi 5 e 6 indicano invece una emulsione a lenta rottura.

La nomenclatura proposta dal CEN è composta di 4 campi come quella di seguito riportata:

C 70 B 2 emulsione cationica, al 70% di bitume, di classe 2 (super rapida in Italia);

C 70 BF 3 emulsione cationica, al 70% di bitume con flussante, di classe 3 (rapida);

C 70 BPF 3 emulsione cationica, al 70% di bitume (modificato o con lattice), contenente flussante, di classe 3 (rapida);

C 60 BP 6 emulsione cationica, al 60% di bitume (modificato o con lattice), di classe 6 (lenta).

5.2.1.3 Proprietà delle emulsioni bituminose

Si possono distinguere le proprietà delle emulsioni bituminose in due gruppi:

- proprietà intrinseche: si tratta di quelle che sono loro proprie, e che non dipendono dalle sostanze minerali con le quali vengono utilizzate. Queste proprietà sono:
 - la viscosità;
 - la stabilità allo stoccaggio
- Proprietà estrinseche: si tratta di quelle che sono legate al loro comportamento nei diversi campi di impiego. Queste proprietà sono:
 - la velocità di rottura;
 - l'adesione;

5.2.1.3.1 Viscosità

La viscosità dipende dalla concentrazione di bitume disperso, dal greggio d'origine e dall'emulsionante utilizzato. Altri fattori influenzano le proprietà reologiche dell'emulsione, in particolare la consistenza, la granulometria dei globuli di bitume e il processo di fabbricazione (tipologia del mulino).

In campo stradale, la viscosità ha una notevole valenza pratica in quanto ne condiziona l'applicazione . Un' emulsione troppo fluida , una volta spruzzata, potrebbe scorrere sulla pendenza del piano riducendo la sua efficacia sia nel caso di “mano d'attacco”, ma soprattutto nel caso di un “trattamento superficiale”. Un'emulsione troppo viscosa impedirebbe la penetrazione in profondità nel caso di “impregnazione” su strada bianca.

5.2.1.3.2 Stabilità allo stoccaggio

Una emulsione stabile non si separa nei suoi elementi costituenti. Un fattore determinante della stabilità allo stoccaggio è la granulometria dell'emulsione che dipende, essa stessa, da diversi parametri:

- tipo e quantità di emulsionanti (tensioattivi);
- pH della fase acquosa;
- origine e gradazione del bitume.

5.2.1.3.3 Velocità di rottura

È il modo rapido o lento in cui avviene il fenomeno elettro-fisico per il quale il bitume si separa dall'acqua. La "rottura" delle emulsioni di bitume è una proprietà fondamentale oggetto di numerose teorie scientifiche. Risulta importante ricordare alcuni concetti di base.

- rottura: è il processo che si sviluppa attraverso le seguenti fasi:
 - decantazione (sedimentazione dei globuli di bitume);
 - flocculazione (avvicinamento dei globuli sedimentati);
 - coagulazione (fusione dei globuli di bitume flocculati e formazione del coagulo);
 - presa: è il fenomeno successivo alla coagulazione che si verifica quando l'emulsione è in contatto con l'aggregato. Il coagulo di bitume inizia a perdere l'acqua rimasta al suo interno e si stringe sempre più intorno all'inerte. Quando il coagulo di bitume, ormai totalmente anidro, disperde anche le frazioni leggere in esso contenute, "l'ammorsamento" è completo. Il legante che rimane è costituito solo da idrocarburi non volatili.

Questo fenomeno finale di dispersione è tipico dei bitumi fluidificanti (cut-back). La velocità di rottura può essere definita analiticamente come "Indice di rottura" e rappresenta la capacità dell'emulsione di impastare una quantità ben definita di fini

standard (polveri silicee). Ad esempio con 100 g di emulsione si possono impastare da 75 a 200 g di “polveri”.

Più è basso il quantitativo di polveri che danno origine ad un impasto legato, più l'emulsione è considerata “rapida”. Da qui ha origine la suddivisione CEN in classi (da 2 a 6 per le emulsioni stradali) per esprimere la velocità di rottura. Alla classe 2 corrispondono solo 75 g di fini standard; ovvero solo 75 g di filler sono stati sufficienti per rompere quel tipo di emulsione. Se ne occorressero 200 g l'emulsione utilizzata sarebbe considerata estremamente “lenta”.

L'intero processo (rottura e presa) è caratterizzato anche da un significativo progressivo cambiamento del colore, che passa dal marrone al nero.

5.2.1.3.4 Adesione

L'adesione è un'altra proprietà fondamentale delle emulsioni e dipende dalla carica elettrostatica conferita dagli emulsionanti ai globuli di bitume ed è funzione della temperatura e dell'eventuale presenza di agenti perturbatori (es. polvere).

L'adesività della coppia bitume/aggregato si spiega schematicamente nel modo seguente: in presenza di materiale lapideo avente caratteristiche alcaline (calcare):

- se si utilizza un emulsione cationica (acida), si ha una reazione tra il materiale calcareo e l'emulsionante con formazione di un “carbonato di ammina” insolubile;
- se si utilizza un emulsione anionica (basica) si ha attrazione dei globuli di bitume caricati negativamente con formazione di un “sapone di calcio” insolubile.

in presenza di un materiale lapideo con caratteristiche acide (silice, quarzite, graniti, porfidi):

- se si utilizza un emulsione cationica, si ha attrazione dei globuli di bitume caricati positivamente e formazione di un “silicato di ammina” insolubile;
- se si utilizza emulsione anionica, non si verifica alcun fenomeno di attrazione né alcuna reazione. In questo caso non c'è adesione.

Di fatto, la maggior parte degli aggregati utilizzati nei lavori stradali è costituita da materiali di natura mista (calcarei e silicei) e su inerti silicei l'emulsione anionica non ha

alcun effetto. Ciò spiega l'utilizzo, ormai ovunque diffuso, di emulsioni esclusivamente cationiche.

5.2.1.3.5 Fattori di influenza sulle proprietà delle emulsioni bituminose

Le proprietà sopraelencate possono essere variate in base alle necessità del caso applicativo, ma non sempre è possibile migliorare un requisito senza rinunciare ad un altro.

I fattori che influenzano le proprietà di un emulsione bituminosa sono:

- quantità di emulsionante trasferito al bitume. E' importante che la maggior parte dell'emulsionante, utilizzato per favorire la dispersione del bitume in acqua, si leghi al bitume ricoprendolo. In caso contrario l'emulsionante rimane sospeso in acqua riducendone la stabilità. Inoltre, una quantità eccessiva di emulsionante in acqua riduce la velocità di rottura influenzando negativamente il fenomeno di adesione del bitume all'inerte;
- distribuzione granulometrica delle particelle di bitume. I parametri che distinguono la distribuzione granulometrica delle particelle sono:
 - deviazione standard: Minore è la deviazione standard maggiore è l'uniformità di distribuzione delle particelle di bitume nell'emulsione;
 - diametro medio: al diminuire del diametro medio delle particelle di bitume aumenta la superficie specifica. All'aumentare della superficie specifica di bitume aumenta la superficie disponibile per l'accoppiamento bitume-emulsionante, migliorando la stabilità. Inoltre, minore sarà l'emulsionante libero in acqua e migliore sarà l'adesione del bitume all'inerte.

Più uniforme sarà la distribuzione granulometrica del bitume in acqua e maggiore sarà la viscosità. In caso contrario i grani più piccoli di bitume agiscono come lubrificante per quelli più grandi riducendo la viscosità.

5.2.1.4 Fabbricazione delle emulsioni bituminose

L'emulsione del bitume consiste nel frammentare il bitume in particelle di dimensioni piccolissime (dell'ordine di pochi micron) caricarle elettricamente e dotarle di potere repulsivo le une verso le altre. La produzione industriale delle emulsioni richiede apparecchiature appropriate in grado di generare una forte azione di taglio al fine di ottenere una dispersione di bitume con un grado di finezza adeguato (mediamente 6-8 micron). Tale azione è generalmente ottenuta mediante mulini colloidali o altre apparecchiature simili atte a creare un arricchimento progressivo della fase disperdente. Durante il processo vanno costantemente monitorati i seguenti "parametri di produzione":

- energia di dispersione. Sono due i principali fattori che influenzano il fenomeno della dispersione del bitume nell'acqua:
 - l'energia meccanica apportata dal mulino, per scindere il bitume in particelle fini;
 - la capacità (in termini energetici) del tensioattivo di facilitare l'emulsione creando una pellicola protettiva attorno alle particelle di bitume che abbassa la tensione superficiale tra le due fasi in questione quella acquosa e quella bituminosa);
 - viscosità e temperatura dei componenti. Affinchè il bitume si disperda bene nella fase acquosa è necessario, che durante il processo di emulsione, la sua viscosità ottimale si mantenga intorno a 200 mPa-sec. La viscosità ottimale è infatti quella che consente al bitume di scindersi con il minimo sforzo di taglio, e contemporaneamente, consente al tensioattivo "di entrare" nella superficie del globulo di bitume e legarsi perfettamente. Generalmente, in relazione al "grado di penetrazione" del bitume, la viscosità ottimale si ottiene per le seguenti temperature;

Penetrazione [dmm]	Temperatura di emulsione [°C]
160/220	140
70/100	150
35/50	160

tab. 5.2 Temperature di emulsione

- nel caso di emulsioni con bitume modificato occorrerà operare a temperature superiori. La soluzione acquosa contenente sapone (emulsionante + acido o emulsionante + soda) deve mantenere sempre una temperatura adeguata affinché l'emulsione, all'uscita del mulino (che è alla pressione atmosferica), si trovi ad una temperatura inferiore a 95 °C. Diversamente, l'acqua si trasformerebbe in vapore dando vita ad una schiuma bituminosa;
- dosaggio dei componenti. Il dosaggio dei componenti deve essere curato con grande precisione, in particolare quello degli emulsionanti e dell'acido. Una variazione di questo dosaggio, anche minima, può avere delle conseguenze importanti.

La fase disperdente dell'emulsione di bitume è composta da acqua e diversi agenti emulsificanti o tensioattivi ed eventualmente anche da lattice di gomma.

La fase dispersa può essere sia di bitume puro (distillato), di bitume con un flussante o di bitume modificato con polimeri.

Le tre illustrazioni che seguono mostrano lo schema di produzione di una emulsione:

- con bitume tradizionale;
- con bitume modificato;
- con bitume e lattice.

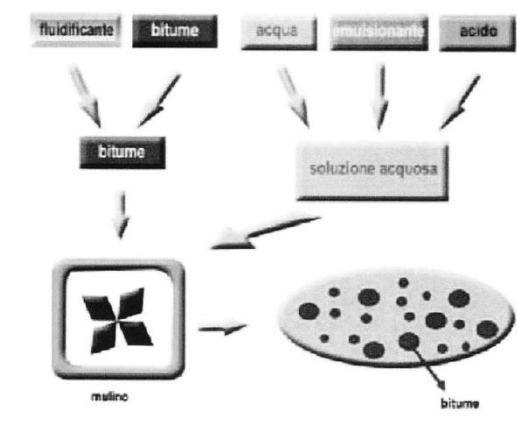


fig. 5.1 Produzione di emulsione bituminosa tradizionale

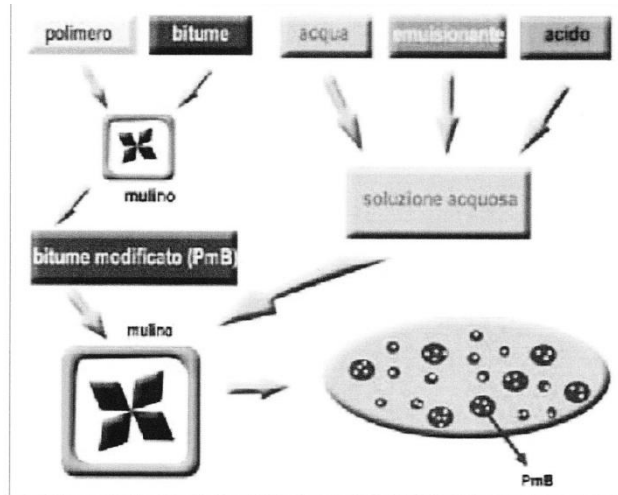


fig. 5.2 Produzione di emulsione da bitume modificato

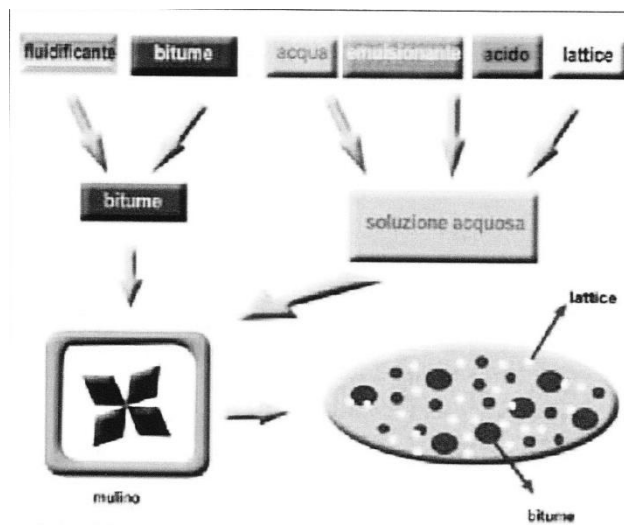


Fig. 5.3 Produzione di emulsione bituminosa con lattice

5.2.1.5 Le emulsioni bituminose anioniche

Per la fabbricazione di emulsioni anioniche si utilizzano frequentemente degli emulsionanti costituiti da Sali alcalini per saponificazione di grassi animali o di resine liquide con soda caustica. La formula generale di questi saponi è:



R è la catena caratteristica dell'acido grasso. Costituisce la parte "apolare" della molecola ed è "lipofila" (affinità con i grassi e quindi con il bitume).

Il gruppo COONa costituisce la parte polare "idrofila" (affinità con l'acqua).

La soluzione nella fase acquosa continua, le molecole di sapone si ionizzano: gli ioni Na^+ costituiscono dei "cationi" dispersi nell'acqua, il resto delle molecole, cioè gli ioni $R - \text{COO}^-$, costituiscono gli "anioni" adsorbiti dai globuli di bitume.

In campo stradale l'impiego delle emulsioni anioniche è limitato alle mani d'attacco in alcune aree geografiche del centro e sud Italia, caratterizzata da situazioni ambientali favorevoli e dalla disponibilità di aggregati di adeguata affinità chimica (calcarei).

Generalmente sono abbastanza semplici da produrre e relativamente meno costose, ma sono anche meno "performanti". In ambito CEN tali emulsioni non sono oggetto di formazione.

5.2.1.6 Le emulsioni bituminose cationiche

Per fabbricare emulsioni cationiche si utilizzano emulsionanti costituiti da molecole la cui formula può essere schematizzata nel modo seguente:



R' è la catena idrocarburica caratteristica del tensioattivo e costituisce la parte "lipofila" della molecola. Il gruppo NH_3Cl costituisce la parte "idrofila". In soluzione nella fase acquosa, le molecole di sapone si ionizzano producendo cationi $R' - \text{NH}_3^+$ e anioni Cl^- .

Durante la fabbricazione dell'emulsione i cationi sono adsorbiti dalle particelle di bitume, la parte lipofila R' è rivolta verso l'interno, il gruppo NH_3^+ si colloca all'interfaccia bitume /acqua, gli anioni Cl^- restano in acqua.

Per via della corona di gruppi NH_3^+ che si è formata alla loro periferia, le particelle di bitume si trovano caricate positivamente. Questo assicura da una parte la stabilità

dell'emulsione per repulsione elettrostatica e dall'altra una buona affinità del globulo di bitume nei confronti delle superfici minerali caricate negativamente (silicei o calcarei). Gli impieghi delle emulsioni cationiche sono numerosi anche in relazione alle condizioni climatiche.

Ne risulta una varietà notevole di formule ed il campo di impiego è incontestabilmente più ampio: non solo mani d'attacco, ma anche trattamenti superficiali, slurry seal, ecc.

5.2.1.7 Stoccaggio delle emulsioni bituminose

L'emulsione può essere stoccata per un periodo che può raggiungere diversi mesi.

Lo stoccaggio può avvenire sia nel luogo stesso di produzione, sia in prossimità dei cantieri d'utilizzo. Lo stoccaggio in fusti, salvo rare eccezioni, non è ormai praticamente più adottato per ragioni pratiche ed economiche.

Dopo uno stoccaggio prolungato si forma, sulla superficie dell'emulsione a contatto con l'aria, una pellicola di bitume detta in gergo "pelle". Questa pellicola non presenta alcun inconveniente, anzi, assicura una certa protezione dell'emulsione.

Durante lo stoccaggio possono verificarsi alcuni fenomeni quella della "sedimentazione" che si traduce in un aumento del tenore di bitume nell'emulsione nella parte bassa del serbatoio, oppure il fenomeno inverso detto "crematura" che si manifesta con aumento del tenore di bitume nella parte alta.

Questi fenomeni si manifestano e progrediscono in funzione:

- della durata dei tempi e delle temperature di stoccaggio;
- di una granulometria di particelle di bitume non adatta.

Sedimentazione e crematura, se non portano ad una coagulazione dell'emulsione, non rappresentano un danno. E' sufficiente procedere ad un rimescolamento dell'emulsione prima della consegna per ritrovare un tenore in bitume omogeneo. Le attrezzature di rimescolamento sono molteplici, dagli agitatori ad elica a basso gradiente di taglio, fino alle pompe di rimescolamento. Il procedimento più efficace è il travaso per pompaggio da un serbatoio all'altro.

L'emulsione è sensibile al gelo che provoca una rottura irreversibile. La temperatura minima dipende dalla composizione dell'emulsione, ma generalmente non deve scendere al di sotto di + 2, +5°C. Per lo stoccaggio può essere utile aggiungere antigelo (glicole).

Nelle attività di laboratorio condotte per l'ottimizzazione della miscela sono state prese in considerazione le seguenti emulsioni:

- emulsione cationica sovrastabilizzata al 60% di bitume residuo (Modificato) con rigenerante incluso C 60 BP 6;
- emulsione cationica a media velocità di rottura e 60% di bitume residuo (Modificato) C 60 BP 4.

5.2.1.8 Stabilizzazione con emulsione bituminosa

5.2.1.8.1 Impiego di emulsioni bituminose

Quando si esegue il riciclaggio con emulsioni bituminose è importante considerare i punti qui di seguito illustrati.

5.2.1.8.2 Studio delle miscele

Come in qualsiasi tipo di stabilizzazione, è buona norma seguire anche in questo caso un'adeguata procedura di mix design per determinare la giusta quantità di legante necessaria per soddisfare i criteri di resistenza. Ogni materiale richiede l'aggiunta di una specifica percentuale di emulsione bituminosa per raggiungere la resistenza ottimale o quella desiderata.

5.2.1.8.3 Formulazione

Per realizzare un'emulsione "tagliata su misura" per una determinata applicazione si utilizzano diversi emulsionanti e additivi in varie proporzioni. Oltre a determinare la quantità di bitume residuo sospeso nell'acqua, la composizione "su misura" mira a controllare le condizioni in cui l'emulsione di bitume si rompe. Dato che il tipo di materiale che viene miscelato con l'emulsione influisce fortemente sulla stabilità (tempo

di rottura) dell'emulsione, è importante che il fabbricante riceva un campione rappresentativo del materiale da riciclare. Inoltre bisogna fornire al fabbricante informazioni dettagliate relative agli eventuali filler attivi da aggiungere all'emulsione bituminosa affinché sia in grado di sviluppare e testare la giusta ricetta compositiva.

5.2.1.8.4 Movimentazione

Le emulsioni bituminose sono suscettibili alle variazioni di temperatura e di pressione. È necessario che gli operatori conoscano bene le condizioni che possono favorire la separazione del bitume dalla sospensione (chiamata "flocculazione" se si svolge lentamente o "rottura flash" se avviene istantaneamente), per evitare che ciò si verifichi già durante la lavorazione in cantiere. Inoltre ai fini di una corretta formulazione, il fabbricante deve conoscere non solo le condizioni presenti in sito, ma anche i dettagli relativi a tutte le pompe che saranno usate per trasferire l'emulsione da una cisterna all'altra e per alimentare la barra spruzzatrice installata sulla riciclatrice. La miscelazione di emulsioni anioniche e cationiche porta all'immediata rottura dell'emulsione, con conseguente intasamento delle pompe e delle tubazioni con bitume viscoso. Si può impedire che ciò si verifichi provvedendo a contrassegnare e stoccare accuratamente le emulsioni e accertandosi che i sistemi di distribuzione non contengano più residui di precedenti applicazioni.

5.2.1.8.5 Contenuto totale di liquido

Il controllo dell'umidità contenuta nel materiale riciclato è uno degli aspetti più importanti della stabilizzazione con emulsioni bituminose.

5.2.1.8.6 Tempo di costipamento

Quando l'emulsione si rompe, il bitume si separa dalla sospensione e la viscosità del liquido aumenta in misura significativa.

Le singole particelle del materiale riciclato saranno ricoperte interamente o solo parzialmente da una sottile pellicola di bitume freddo e viscoso, il che rende più difficile il costipamento del materiale. Pertanto il costipamento dovrebbe concludersi prima o durante il processo di rottura dell'emulsione.

5.2.1.8.7 Controllo di qualità

I provini (per le prove di resistenza) sono normalmente confezionati da campioni prelevati nel tratto immediatamente retrostante la riciclatrice. Vanno confezionati prima che l'emulsione si rompa, in modo da ottenere dei campioni simili al materiale costipato sulla strada. Spesso l'unico modo per ottenerli consiste nel disporre di un'attrezzatura portatile per confezionare i provini in cantiere. In alternativa si potranno prelevare carote in un tempo successivo, dopo che lo strato è completamente asciutto.

5.2.1.8.8 Maturazione

Una miscela stabilizzata con un'emulsione deve dissipare l'acqua in eccesso, ossia maturare, affinché la sua resistenza aumenti. Anche se taluni materiali stabilizzati con un'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 fra emulsione e aggregati, dal clima locale (temperatura, precipitazioni e umidità atmosferica) e dalla percentuale di vuoti della miscela.

L'aggiunta di cemento influisce in maniera significativa sulla velocità di acquisizione della resistenza. Ciò è particolarmente utile qualora uno strato riciclato debba essere

riaperto al traffico già poco tempo dopo il trattamento. Da 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 preferibilmente all'1,5%, e al massimo al 2%.

5.2.1.8.9 Concetto di contenuto totale di liquido

Per definire il rapporto umidità-densità quando si lavora con le emulsioni bituminose, non si considera il contenuto di umidità ma il "contenuto totale di liquido". La densità massima si ottiene in presenza del contenuto totale ottimale di liquido (F_{opt}), che corrisponde alla massa combinata dell'umidità e dell'emulsione bituminosa presenti nella miscela. Prima della rottura, l'emulsione bituminosa è un liquido con viscosità leggermente superiore a quella dell'acqua. Sia la componente bituminosa che quella acquosa di un'emulsione agiscono come un lubrificante, contribuendo al costipamento. Per questo motivo entrambe le componenti vanno incluse come liquidi nel calcolo. Ciò è illustrato in fig. 5.4.

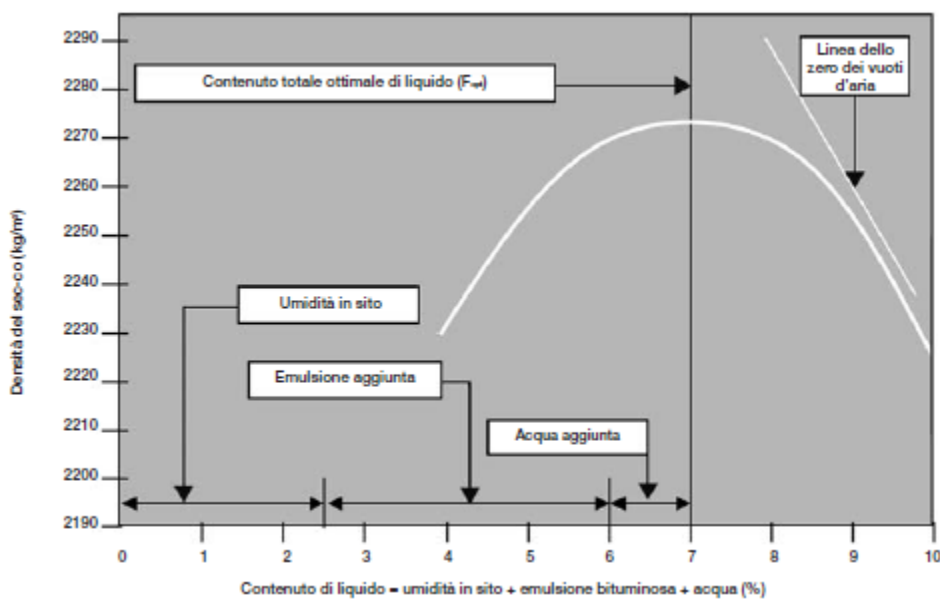


fig. 5.4 Esempio di calcolo dei liquidi per un materiale stabilizzato con un'emulsione bituminosa

L'esempio illustrato in fig. 5.4 mostra il contenuto di umidità in sito pari al 2,5%, cui va ad aggiungersi il 3,5% dell'emulsione bituminosa iniettata durante il riciclaggio. In condizioni di costipamento standard il materiale ha un contenuto totale ottimale di liquido del 7%. Quindi durante il riciclaggio si può aggiungere un ulteriore 1,0% d'acqua per portare il contenuto totale di liquido al valore ottimale (Fopt). Altrimenti si potrà aumentare l'energia di costipamento applicata per raggiungere la densità massima. Se il contenuto totale di liquido del materiale si avvicina al livello di saturazione (come indicato dalla linea dello zero dei vuoti d'aria), sotto il rullo compressore si svilupperanno pressioni idrauliche che determineranno un rigonfiamento del materiale. In presenza di tali condizioni è impossibile costipare il materiale. Quando il contenuto di umidità in sito è alto (cioè sta avvicinandosi a Fopt), aggiungendo un'emulsione bituminosa il contenuto totale di liquido aumenterà oltre il punto di saturazione. Tale problema non può essere risolto semplicemente riducendo la quantità di emulsione bituminosa aggiunta, in quanto ciò comprometterebbe la qualità del prodotto stabilizzato. Ma altrettanto sbagliato sarebbe cedere alla tentazione di aggiungere cemento alla miscela per "assorbire l'umidità in eccesso", dal momento che tale procedimento aumenterebbe la rigidità del materiale alterando la natura del prodotto. Il miglior modo per ovviare ad elevati contenuti d'umidità in sito consiste nel prepolverizzare la pavimentazione esistente, permettendo al materiale scoperto di asciugarsi sufficientemente prima di procedere alla stabilizzazione.

5.2.1.8.10 Proprietà tipiche dei materiali stabilizzati con emulsioni bituminose

Le più importanti proprietà meccaniche dei materiali stabilizzati con emulsioni bituminose sono indicate di seguito. Tali proprietà si potranno conseguire aggiungendo la quantità ottimale di emulsione bituminosa, determinata con l'ausilio di una procedura di

mix design. Oltre all'aggiunta di una percentuale di cemento compresa tra l'1 e l'1,5%, la percentuale di bitume residuo è solitamente compresa negli intervalli riportati in tab. 5.3.

Tipo di materiale	Emulsione bituminosa (%)	Bitume residuo (%)
RAP/aggregati lapidei frantumati (miscela 50:50)	2,5 - 5,0	1,5 - 3,0
Aggregati lapidei frantumati a granulometria assortita	4,0 - 6,5	2,5 - 4,0
Ghiaia naturale (IP < 10, CBR > 30)	5,0 - 7,5	3,0 - 4,5

tab. 5.3 Percentuali tipiche di emulsioni residuo (in massa)

Filosofie di progetto alternative esistono laddove si aggiungono basse percentuali di emulsione (dallo 0,5 all'1,5%) esclusivamente allo scopo di permettere un miglior costipamento ed aumentare la resistenza all'umidità del materiale, ma non necessariamente per migliorare le proprietà di taglio e di resistenza.

5.2.1.8.11 Resistenza e rigidezza

Ricerche in corso in Sudafrica hanno dimostrato che un materiale stabilizzato con un'emulsione bituminosa presenta caratteristiche di resistenza e rigidezza simili a quelle di un materiale trattato con bitume schiumato.

5.2.1.8.12 Tempo di lavorazione

Non esistono specifici limiti temporali per la lavorazione delle emulsioni bituminose. La sola condizione da soddisfare è che l'intero processo di lavorazione, costipamento e finitura si sia concluso prima che l'emulsione si rompa.

5.2.1.8.13 Densità

Come già descritto in precedenza per i materiali trattati con cemento, il costipamento dovrebbe sempre essere finalizzato a raggiungere la massima densità possibile nelle condizioni riscontrate in sito (la cosiddetta “densità in sito”). Viene normalmente specificata una densità minima come percentuale della densità AASHTO modificata. Per gli strati di base stabilizzati con bitume essa è normalmente compresa tra il 98% e il 102%. Talvolta è consentito un gradiente di densità, specificando una densità “media”. Ciò significa che la densità alla sommità dello strato può essere maggiore rispetto a quella nella parte inferiore. In tali casi è normalmente specificato anche uno scostamento massimo del 2% per la densità misurata nel terzo inferiore dello spessore dello strato. Quindi, se la densità media specificata è pari al 100%, la densità alla base dello strato dovrà essere superiore al 98%. Per aggregati di qualità migliore (ad es. con un indice di portanza CBR > 80%) è consigliabile specificare una densità assoluta come la “massa volumica apparente” o la “densità relativa apparente” dell’aggregato.

5.2.2 Stabilizzazione con bitume schiumato

5.2.2.1 Generalità

Il bitume caldo (160 – 180 °C) si trasforma in una sostanza schiumosa quando viene miscelato in un’apposita camera di espansione con una piccola quantità d’acqua fredda molecolarizzata (di norma il 2% in massa). Allo stato schiumato (uno stato temporaneo di bassa viscosità) il bitume può essere aggiunto e mescolato con aggregati a temperatura ambiente e con contenuto d’umidità in sito. Il processo di schiumatura del bitume è paragonabile al lavoro svolto da un pasticcere che monta l’albume di un uovo fino ad ottenere una massa schiumosa a bassa viscosità, prima di amalgamarvi la farina. La montatura trasforma l’albume in una schiuma formata da bollicine d’aria aventi una pelle sottile e che occupa un volume di gran lunga maggiore rispetto allo stato iniziale. Ciò è necessario perché l’albume si distribuisca omogeneamente fra le particelle fini di farina, in modo da ottenere una miscela consistente.

Il processo di schiumatura del bitume dipende dal fatto che l'acqua cambi il suo stato di aggregazione da liquido a gassoso.

Alle normali pressioni atmosferiche tale processo è accompagnato da un'espansione di circa 1500 volte del volume originale allo stato liquido. Quando le particelle d'acqua vengono a contatto con il bitume caldo, l'energia termica del bitume viene trasmessa all'acqua. Non appena la temperatura dell'acqua raggiunge il punto di ebollizione, l'acqua cambia stato creando una bolla piena di vapore acqueo e ricoperta da una pelle sottile di bitume.

Il professor Ladis Csanyi del Centro Sperimentale di Ingegneria dell'Iowa State University fu il primo, nel 1956, a rendersi conto delle potenzialità del bitume schiumato come legante. In seguito tale tecnologia fu affinata dalla Mobil Oil, che mise a punto la prima camera di espansione per miscelare acqua con bitume per produrre una sostanza schiumosa. Il sistema sviluppato da Wirtgen a metà degli anni Novanta del secolo inietta sia aria che acqua nel bitume caldo contenuto in una camera di espansione, come mostrato in fig. 5.5.

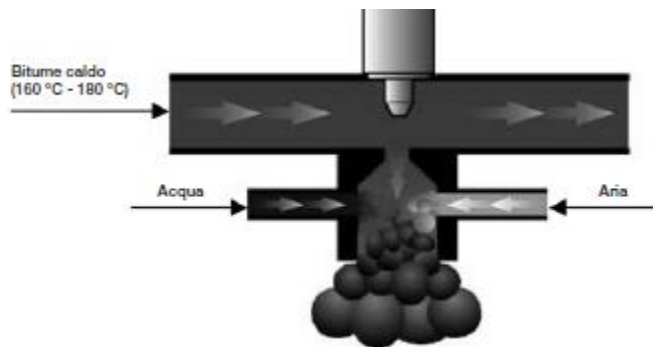


fig. 5.5 La produzione di bitume schiumato

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. Rispetto alla stabilizzazione con emulsioni bituminose, quella con bitume schiumato offre i vantaggi qui di seguito riportati:

- una riduzione dei costi sostenuti per il legante e per il suo trasporto, poiché il bitume schiumato è costituito da un tipo di bitume avente un indice di penetrazione standard e da una piccola percentuale d'acqua (di norma soltanto il 2% in massa del bitume). Utilizzando il bitume schiumato non bisogna sostenere alcun costo di produzione. L'unico investimento è quello richiesto inizialmente per l'acquisto delle attrezzature;
- una volta steso e costipato il materiale trattato con bitume schiumato, la strada può essere riaperta immediatamente al traffico;
- Il materiale trattato con bitume schiumato rimane lavorabile per lunghi periodi e di conseguenza può essere stoccato anche in condizioni climatiche avverse senza che il bitume venga dilavato dagli aggregati;
- Il bitume schiumato 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.

Così come avviene nella stabilizzazione con emulsioni bituminose, anche nel caso del bitume schiumato vengono normalmente aggiunte piccole quantità di cemento o calce. Oltre a migliorare la capacità di mantenimento della resistenza dopo il contatto con l'acqua, un tale filler attivo aiuta a disperdere meglio il bitume aumentando la frazione del materiale minore di 0,075 mm.

Inoltre migliora la lavorabilità della miscela e ne riduce l'indice di plasticità.

Benché i vantaggi del bitume schiumato siano stati scoperti già negli anni Cinquanta del secolo scorso, si sono realizzati solo pochi progetti con tale tecnologia, principalmente su brevi tratti sperimentali accompagnati da limitate attività di ricerca.

5.2.2.2 Caratteristiche del bitume schiumato

Il bitume schiumato è caratterizzato da due proprietà principali:

- il rapporto di espansione è una misura della viscosità della schiuma e determina come essa si disperderà nella miscela. È calcolato come rapporto fra il volume massimo della schiuma di bitume in relazione al volume originale del bitume non schiumato;

- il tempo di dimezzamento è una misura della stabilità della schiuma e fornisce un'indicazione sulla velocità di collasso della schiuma. È calcolato come il tempo, espresso in secondi, durante il quale il volume massimo raggiunto dal bitume nel processo di schiumatura si riduce della metà.

Tali proprietà sono illustrate in fig. 5.6.

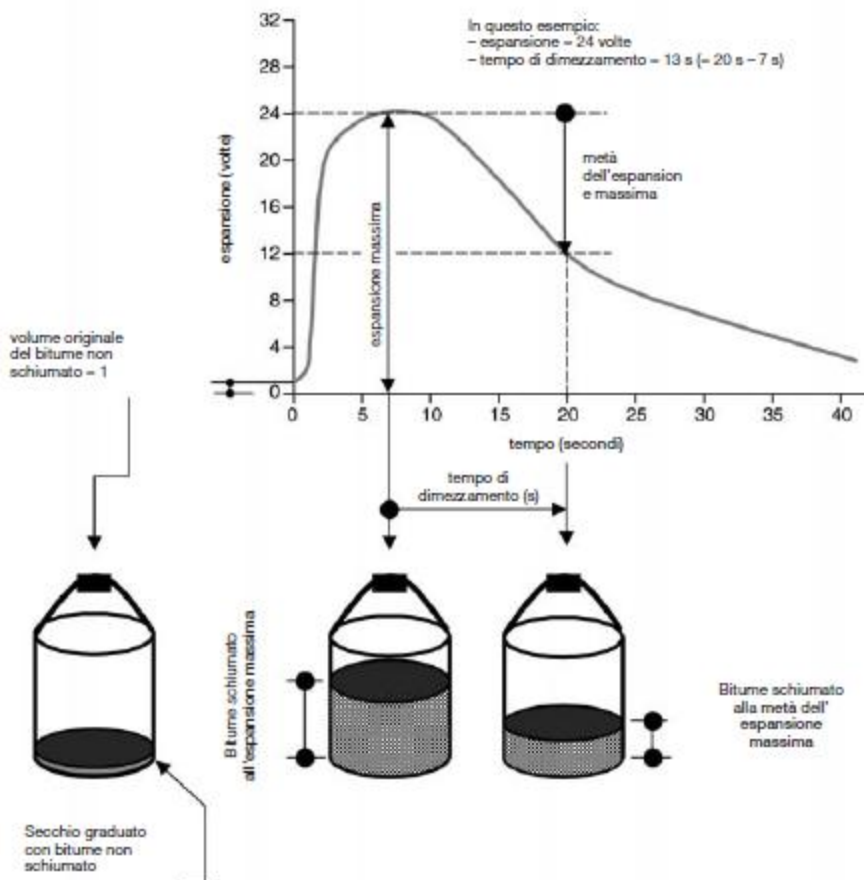


fig. 5.6 Caratteristiche del bitume schiumato

5.2.2.3 Fattori influenzanti le proprietà schiumogene

Generalmente la schiuma “migliore” è quella che riesce ad ottimizzare sia il rapporto di espansione che il tempo di dimezzamento.

Il rapporto di espansione e il tempo di dimezzamento del bitume schiumato sono influenzati dai seguenti fattori:

- **Aggiunta d'acqua.** Aumentando la quantità d'acqua iniettata nel bitume, il volume della schiuma prodotta aumenta di 1500 volte. Dunque aumentando la quantità d'acqua crescono le dimensioni delle bolle create e di conseguenza aumenta il rapporto di espansione. Però con il crescere delle dimensioni delle singole bolle si riduce anche lo spessore della pellicola di bitume, il che si riflette in una minore stabilità della schiuma, con conseguente riduzione del tempo di dimezzamento. Il rapporto di espansione e il tempo di dimezzamento sono inversamente correlati con la quantità d'acqua aggiunta.
- **Tipo di bitume.** Per la produzione di bitume schiumato sono generalmente usati bitumi aventi indici di penetrazione compresi fra 80 e 150, benché nel passato si siano usati con successo anche bitumi più solidi soddisfacenti i requisiti minimi riguardanti le proprietà schiumogene. Generalmente i bitumi più solidi non vengono usati per ragioni pratiche, dal momento che producono una schiuma di qualità più scadente che comporta una peggiore dispersione nella miscela.
- **Provenienza del bitume.** Alcuni tipi di bitume schiumano meglio di altri per via della loro composizione. Le proprietà schiumogene dei bitumi provenienti dal Venezuela, ad esempio, sono di gran lunga migliori di quelle della maggior parte dei bitumi di origine diversa.
- **Temperatura del bitume.** La viscosità del bitume è inversamente proporzionale alla temperatura: la viscosità diminuisce con l'aumentare della temperatura. Ne consegue logicamente che quanto più bassa è la viscosità tanto più grandi sono le bolle che si formano quando l'acqua cambia stato durante il processo di schiumatura. Dato che tale processo sottrae energia termica al bitume, per ottenere un prodotto di qualità soddisfacente la temperatura prima della schiumatura deve essere superiore ai 160 °C.
- **Pressione del bitume e dell'acqua.** Il bitume e l'acqua sono iniettati nella camera di espansione attraverso ugelli di piccolo diametro. Aumentando la pressione nelle linee di alimentazione si ottiene una dispersione (atomizzazione) dei flussi attraversanti gli ugelli. Quanto più piccole sono le singole particelle, tanto maggiore è l'area di contatto disponibile, e di conseguenza migliora l'omogeneità della schiuma.

- **Additivi.** Sul mercato esistono numerosi prodotti di marca che influiscono sia negativamente (agenti antischiuma) che positivamente (agenti schiumogeni) sulle proprietà schiumogene del bitume. Gli schiumogeni sono solitamente richiesti soltanto qualora un bitume sia stato trattato con un antischiuma (normalmente durante il processo di raffinazione). La maggior parte degli schiumogeni tende ad essere sensibile al calore, e siccome sono aggiunti al bitume prima che esso venga riscaldato alla temperatura di applicazione, la loro azione è di durata piuttosto breve. Per sfruttare i vantaggi derivanti dall'aggiunta di uno schiumogeno, il bitume andrà pertanto lavorato nel giro di poche ore. Essendo tuttavia tali prodotti in genere molto costosi, di solito sono considerati solo come ultima risorsa per migliorare le proprietà schiumogene di un bitume ostinato. (Miscelando il bitume con gasolio si è potuta diminuire la viscosità in misura tale da ottenere una schiuma di qualità accettabile. Tale procedura è tuttavia consigliabile soltanto se viene eseguita dal fornitore di bitume stesso.)

5.2.2.4 Proprietà schiumogene accettabili

Ogni bitume previsto per la produzione di bitume schiumato andrebbe testato in laboratorio per determinarne le proprietà schiumogene. L'obiettivo di tale procedura è quella di individuare la combinazione di aggiunta d'acqua e temperatura del bitume che consente di ottenere la schiuma ottimale (rapporto massimo di espansione e tempo massimo di dimezzamento). Come già descritto in precedenza, ogni bitume è diverso dall'altro, e possono variare persino diversi lotti di bitume della stessa provenienza. L'esecuzione della semplice procedura di laboratorio permette tuttavia di determinare per ogni tipo di bitume la giusta quantità d'acqua da aggiungere e la temperatura ottimale, in modo da poter adottare tali parametri in sito per la stabilizzazione con bitume schiumato su larga scala.

Non esistono limiti superiori per le proprietà schiumogene. L'obiettivo dovrebbe essere sempre quello di produrre la schiuma qualitativamente migliore per la stabilizzazione. Problemi si riscontrano solo quando un bitume non produce una schiuma "buona", il che rende necessario riconoscere valori limite inferiori. I valori minimi normalmente accettati

per il rapporto di espansione e il tempo di dimezzamento per la stabilizzazione di materiale a 25 °C sono:

- rapporto di espansione 10 volte;
- tempo di dimezzamento 8 secondi.

L'esperienza insegna come un'adeguata dispersione della schiuma e una stabilizzazione efficace siano possibili anche quando il rapporto di espansione è ridotto a sole 8 volte e il tempo di dimezzamento è di soli 6 secondi. Ciò è tuttavia spesso ascrivibile a fattori diversi dalle proprietà schiumogene, ad esempio a temperature elevate del materiale.

Nel corso delle ricerche condotte sul bitume schiumato durante gli ultimi anni Novanta, il professor Jenkins ha sviluppato il concetto di "indice di schiuma" per misurare la combinazione di rapporto di espansione e tempo di dimezzamento. Ha definito l'indice di schiuma come l'area sotto la curva rapporto di espansione/ tempo di dimezzamento, e ne ha tratto la seguente conclusione: quanto migliori sono le proprietà schiumogene, tanto maggiore è l'indice di schiuma e tanto migliore è il prodotto stabilizzato ottenuto. In seguito il professor Jenkins ha messo a confronto l'indice di schiuma con la temperatura del materiale al momento della miscelazione, concludendo che con l'aumentare della temperatura del materiale è possibile ottenere una stabilizzazione efficace anche con un indice di schiuma più basso.

5.2.2.5 Dispersione del bitume schiumato

A differenza dei conglomerati bituminosi a caldo, il materiale stabilizzato con bitume schiumato non ha un aspetto nero. Ciò è dovuto al fatto che gli aggregati più grossi non sono ricoperti di bitume. Quando il bitume schiumato viene a contatto con gli aggregati, le bolle di bitume scoppiano dando origine a milioni di minuscole goccioline di bitume che scovano le particelle fini, in particolare la frazione minore di 0,075 mm, e aderiscono alla loro superficie. Le goccioline di bitume possono trasmettere il calore solo alla frazione di filler e hanno quindi ancora una viscosità sufficientemente bassa per avvolgere le particelle.

La miscela schiumata produce quindi un filler legato con bitume che agisce come una malta fra le particelle grosse. Pertanto in seguito al trattamento il materiale si scurisce solo leggermente.

L'aggiunta di cemento, calce o altro materiale similmente fine (passante al 100% al setaccio da 0,075 mm) favorisce la dispersione del bitume, in particolare qualora il materiale riciclato presenti una carenza di fini (ad esempio meno del 5% passante al setaccio da 0,075 mm). Ricerche limitate hanno evidenziato come i filler attivi (e in particolare il cemento), oltre ad integrare il filler naturale, grazie alla loro azione pozzolanica creino sulla superficie delle particelle delle irregolarità alle quali le goccioline di bitume tendono ad aderire.

5.2.2.6 Idoneità del materiale al trattamento con bitume schiumato

Il processo con bitume schiumato è idoneo al trattamento di un ampio ventaglio di materiali, che spazia dalle sabbie alle ghiaie degradate dagli agenti atmosferici, dagli aggregati lapidei frantumati al fresato bituminoso. Nel passato in tale processo sono stati usati con successo inerti sia vergini che riciclati, di qualità sia buona che scadente. Ciò nonostante è importante definire i limiti di accettabilità degli inerti ed individuare la composizione ottimale di un aggregato usato per la produzione di una miscela con bitume schiumato.

Un materiale caratterizzato da una carenza di fini non si mescola bene con il bitume schiumato.

Quando un materiale ha una percentuale di fini troppo bassa, il bitume schiumato non si disperde in maniera adeguata e tende a formare le cosiddette "venature" (agglomerazioni di materiale fine ricche di bitume) in tutto il materiale riciclato. Le dimensioni di tali venature variano in funzione della carenza di fini. Una forte carenza di fini produrrà molte venature larghe che tenderanno ad agire come un lubrificante all'interno della miscela, riducendone così la resistenza e la stabilità.

Semplici prove granulometriche di laboratorio eseguite su campioni rappresentativi prelevati dalla pavimentazione stradale esistente indicheranno ogni eventuale carenza relativa al contenuto di fini. Tale carenza potrà essere corretta importando del materiale sufficientemente fine e distribuendolo sulla superficie stradale prima di procedere al riciclaggio. I materiali coesivi andrebbero però maneggiati con cura perché le solite analisi granulometriche di laboratorio indicano un'alta percentuale passante al setaccio da

0,075 mm, mentre in cantiere la qualità di miscelazione è spesso scadente. Ciò è dovuto alla natura coesiva del materiale, che induce i fini ad aggregarsi in modo tale che non siano più disponibili per la dispersione del bitume schiumato. Il confronto dei risultati delle prove granulometriche eseguite in laboratorio su materiale lavato e non lavato mette in evidenza la probabilità con cui tale problema insorgerà e l'analisi granulometrica del materiale non lavato fornirà un'indicazione dei fini disponibili.

Il materiale che presenta una carenza di fini può essere migliorato aggiungendovi cemento, calce o altri materiali simili passanti al 100% al setaccio da 0,075 mm. Andrebbe però evitata l'aggiunta di cemento in quantità superiori all'1,5% in massa per via delle ricadute negative sulla flessibilità dello strato stabilizzato.

In tal modo si otterranno miscele di bitume schiumato ed inerti lapidei con le proprietà più desiderabili. Una relazione unica per ottenere la percentuale minima di vuoti consentendo al tempo stesso di variare la percentuale di filler è rappresentata nell'equazione 5.1. Tale relazione è utile in quanto offre flessibilità nella definizione della percentuale di filler di una miscela. Per ottenere la minima percentuale di vuoti possibile si adotta un valore $n = 0,45$.

[Equazione 5.1]

$$P = \frac{(100 - F) (d^n - 0.075^n)}{(D^n - 0.075^n)} + F$$

dove: d = apertura del vaglio prescelto [mm]

P = percentuale (in massa) passante al vaglio di apertura d [mm]

D = pezzatura massima degli aggregati [mm]

F = percentuale di filler (inerte e attivo)

n = variabile dipendente dalle caratteristiche di impaccettamento degli inerti

L'ottenimento di una granulometria continua nella frazione minore di 2 mm è importante per la corretta dispersione del bitume schiumato e per agevolare il costipamento. Inoltre consente di ridurre la percentuale dei vuoti e la suscettività del materiale all'ingresso d'acqua. Se necessario, si dovrebbe pertanto prendere in considerazione la miscelazione di due materiali per migliorare le caratteristiche granulometriche critiche.

5.2.2.7 Campioni di materiale usati per lo studio delle miscele

Il metodo di campionamento dei materiali usati per lo studio delle miscele con bitume schiumato è molto importante. Se il controllo sul cantiere è inadeguato o la miscela è formulata in modo scorretto, le prove saranno eseguite su campioni non rappresentativi, con risultati falsati che possono comportare serie conseguenze. Pertanto si devono considerare tre fattori importanti:

- La profondità di riciclaggio e le proporzioni di ogni strato in sito che viene miscelato per formare uno strato composito rappresentativo.
- Identificazione della variabilità nel tipo di materiale su tutta la lunghezza e la profondità della pavimentazione esistente, in modo che si possa studiare un numero di miscele sufficiente per tenere conto di tali variazioni. Laddove si riscontra variabilità, i singoli strati vanno suddivisi mediante vagliatura nelle rispettive frazioni e rimiscelati nei rapporti richiesti. In tal modo si può ottenere la miscela più accurata e studiare l'influenza delle variazioni granulometriche sulle proprietà della miscela trattata con bitume schiumato.
- Preparazione del conglomerato bituminoso esistente per la miscelazione nella miscela composita. L'uso di una fresa piccola per il campionamento di uno o più strati in conglomerato bituminoso è il metodo più idoneo per ottenere campioni rappresentativi.

5.2.2.8 Impiego del bitume schiumato

Quando si lavora con bitume schiumato è importante considerare i punti illustrati qui di seguito.

5.2.2.9 Aspetti della sicurezza

Perché l'acqua possa reagire e dar luogo alla formazione di una schiuma di qualità accettabile, la temperatura del bitume deve essere elevata (normalmente > 160 °C). A

temperature talmente alte il bitume si trasforma in una sostanza estremamente pericolosa, che può essere letale se maneggiata senza le dovute precauzioni. I fabbricanti di conglomerati bituminosi, che lavorano ogni giorno con il bitume bollente, conoscono benissimo i possibili rischi. Chi opera nel settore del riciclaggio e si aggiudica per la prima volta un appalto per la realizzazione di un progetto che prevede l'impiego di bitume schiumato deve assicurarsi che il proprio personale venga adeguatamente istruito e preparato. Per la manipolazione del bitume schiumato sono applicabili le stesse norme di sicurezza documentate per i conglomerati bituminosi a caldo.

5.2.2.10 Temperatura del materiale

La temperatura dell'aggregato è uno dei principali fattori influenzanti la corretta dispersione del bitume schiumato e conseguentemente anche la resistenza conseguita nel nuovo strato della pavimentazione. Come menzionato in precedenza, l'indice di schiuma sviluppato dal professor Jenkins rappresenta le proprietà schiumogene combinate di un bitume (rapporto di espansione e tempo di dimezzamento). I risultati delle sue ricerche hanno evidenziato come l'indice di schiuma e la temperatura dell'aggregato (al momento della miscelazione) siano fattori importanti per la dispersione conseguita. Per ottenere una miscela soddisfacente anche a temperature inferiori sono necessari indici di schiumatura maggiori (cioè rapporti di espansione e tempi di dimezzamento migliori). Benché le implicazioni di tale scoperta siano significative, è importante confrontare le condizioni di laboratorio con quelle riscontrate in cantiere. La qualità di una schiuma prodotta da un'attrezzatura di laboratorio è sempre peggiore di quella prodotta da una grande riciclatrice. Ciò è dovuto principalmente alle maggiori pressioni operative in cantiere e alla continuità di lavorazione, che permette al sistema di funzionare a temperature più elevate. Essendovi uno scostamento fra i rilievi di laboratorio e quelli sul campo, è importante verificare le proprietà schiumogene in cantiere. Tali rilievi andrebbero quindi confrontati con la temperatura dell'aggregato (non della superficie stradale) e i risultati verificati con i para-metri indicativi riportati in tab. 5.4.

Indice di schiuma	Rapporto di espansione (indiretto)	Temperatura dell'aggregato (°C)		
		< 15 °C	15 °C a 25 °C	> 25 °C
< 75	< 8	Pessima	Scadente	Discreta
75 – 150	8 – 12	Discreta	Buona	Buona
> 150	> 12	Buona	Ottima	Ottima

tab. 5.4 Dispersione del bitume schiumato (miscibilità)

Se la temperatura dell'aggregato scende sotto i 10 °C, è buona norma non prendere in considerazione un trattamento con bitume schiumato.

5.2.2.11 Costanza delle forniture di bitume

Quando si collega una nuova autocisterna alla riciclatrice bisogna eseguire due controlli di base per accertarsi che il bitume fornito sia idoneo alla schiumatura:

- controllare la temperatura del bitume nell'autocisterna usando un termometro tarato (gli indicatori di temperatura di cui sono dotate le autocisterne sono notoriamente inaffidabili);
- controllare la qualità della schiuma con l'ausilio dell'ugello di prova presente sulla riciclatrice. Per ottenere un campione veramente rappresentativo, prima di procedere al prelievo occorre attendere che durante il riciclaggio siano passati attraverso la barra spruzzatrice almeno 100 litri di bitume.

5.2.2.12 Flusso di bitume

Il bitume, portato in cantiere all'interno di autocisterne dotate di condotti riscalda ti a fuoco, talvolta è contaminato da particelle di carbone che si formano sulle pareti dei condotti durante il riscaldamento. Se si fanno fuoriuscire dalla cisterna anche le ultime tonnellate di bitume, le particelle indesiderate sono trascinate nel sistema della riciclatrice dove possono causare intasamenti. Si può facilmente evitare l'insorgere di tale problema accertandosi che il filtro posizionato sulla linea di alimentazione sia perfettamente

funzionante. Ogni aumento anomalo della pressione indicherà la necessità di pulire il filtro, un'operazione che va comunque eseguita periodicamente (ad es. alla fine di ogni turno).

5.2.2.13 Pressione del bitume

La qualità della schiuma dipende dalla pressione d'esercizio nel sistema di alimentazione del bitume. Quanto più alta è la pressione, tanto più sarà "atomizzato" il flusso di bitume passante attraverso l'ugello nella camera di espansione. Ciò assicura che le minuscole particelle di bitume vengano a contatto con l'acqua che giunge anch'essa in forma atomizzata nella camera di espansione, favorendo quindi l'omogeneità della schiuma. Se il bitume entrasse nella camera di espansione sotto forma di un flusso continuo (come succede in presenza di basse pressioni), l'acqua impatterebbe soltanto su un lato del flusso di bitume, creando schiuma in quel punto, mentre sul lato opposto il bitume caldo non verrebbe schiumato. È pertanto assolutamente indispensabile mantenere il sistema ad una pressione d'esercizio minima superiore a 3 bar.

5.2.2.14 Aggiunta di un filler attivo

Come già descritto in precedenza, è prassi comune aggiungere una piccola quantità di cemento o di un altro legante cementizio durante il riciclaggio con bitume schiumato. In sede di pretrattamento con cemento bisogna però prestare particolare attenzione, in quanto il processo d'idratazione inizia non appena la polvere asciutta viene a contatto con l'umidità, legando i fini e riducendo sensibilmente la frazione di 0,075 mm. Quando poi vi si aggiunge il bitume schiumato, la miscela sarà di qualità scadente perché i fini non saranno presenti in quantità sufficiente a disperdere le particelle di bitume. Pertanto è buona norma aggiungere il cemento sempre contemporaneamente al bitume schiumato.

5.2.2.15 Rilavorazione dello strato finito

Il materiale trattato con bitume schiumato può essere rilavorato senza comprometterne la resistenza finale, a condizione che il contenuto d'umidità sia mantenuto approssimativamente allo stesso livello rilevato al momento del costipamento. Questa caratteristica del materiale trattato con bitume schiumato rappresenta un vantaggio quando si opera su una strada che deve essere riaperta al traffico prima che siano state completate le opere di finitura. Il materiale può essere rilavorato il giorno successivo (solitamente previa rifresatura), dopodiché può essere ultimato in modo appropriato. Se però il materiale viene lasciato asciugare completamente, la rilavorazione ne comprometterà la resistenza finale.

5.2.2.16 Proprietà tipiche dei materiali stabilizzati con bitume schiumato

Le più importanti proprietà meccaniche dei materiali stabilizzati con bitume schiumato sono descritte di seguito. Tali proprietà saranno raggiunte aggiungendo alla miscela la quantità di bitume schiumato ottimale, determinata secondo la procedura di mix design. Le percentuali riportate nella colonna destra della tab. 5.5 sono utili per scegliere le quantità approssimative di bitume schiumato da aggiungere in fase di studio delle miscele e sono di norma valide quando la miscela contiene l'1% di filler attivo (calce o cemento).

Percentuale passante (%)		Aggiunta di bitume schiumato (% degli aggregati secchi)
al crivello da 4,75 mm	al setaccio da 0,075 mm	
< 50	3.0 - 5.0	2.0 - 2.5
	5.0 - 7.5	2.0 - 3.0
	7.5 - 10.0	2.5 - 3.5
	> 10.0	3.0 - 4.0
> 50	3.0 - 5.0	2.0 - 3.0
	5.0 - 7.5	2.5 - 3.5
	7.5 - 10.0	3.0 - 4.0
	> 10.0	3.5 - 4.5

fig.5.5 Percentuali di bitume tipiche in relazione alle principali frazioni dell'aggregato

Nota: Le percentuali di bitume schiumato riportate nella precedente tabella sono solo indicative dei valori ottimali. Oltre che dalle frazioni dell'aggregato, il contenuto ottimale di bitume schiumato è influenzato da parecchi altri fattori, per cui è assolutamente indispensabile eseguire un adeguato studio della miscela per determinare il valore ottimale per ogni materiale. (Inoltre si dovrebbe tenere presente che nella stabilizzazione con bitume schiumato non è sempre necessario aggiungere la quantità ottimale. A seconda dell'approccio progettuale, l'aggiunta di una quantità di bitume schiumato inferiore alla percentuale ottimale può senz'altro bastare per ottenere le proprietà richieste. Tale percentuale è chiamata "contenuto minimo di legante".)

5.2.2.17 Resistenza

Il materiale stabilizzato con bitume viene normalmente valutato in base alla resistenza a trazione indiretta (R_t) piuttosto che eseguendo prove Marshall. La tab. 4.6 illustra i valori tipici raggiunti con tali prove.

La prova si esegue su provini con diametro di 100 mm e/o 150 mm, confezionati e lasciati stagionare secondo i metodi. Inoltre la sensibilità all'acqua del materiale viene solitamente determinata su provini con diametro di 100 mm in termini di resistenza a trazione residua (RTR), come illustrato nell'equazione seguente:

[Equazione 5.2]

$$RTR = \frac{R_{t_{a \text{ umido}}}}{R_{t_{a \text{ secco}}}}$$

La resistenza a trazione ad umido si ottiene immergendo i provini maturati per 24 ore in acqua prima di eseguire la prova.

Tipo di materiale	Provini Marshall 100 mm ø		Provini Proctor 150 mm ø
	Rt _{max} (kPa)	Rapporto RTR	Rt _{max} (kPa)
RAP/aggregati lapidei frantumati (50:50)	250 – 600	0.8 – 1.0	120 – 250
Aggregati lapidei frantumati a granulometria assortita	200 – 500	0.6 – 0.9	120 – 200
Ghiaia naturale (IP < 10, CBR > 30)	150 – 450	0.3 – 0.75	80 – 150

tab.5.6 Valori tipici di resistenza a trazione indiretta dei materiali stabilizzati con bitume

Ricerche recenti hanno portato all'introduzione della prova di resistenza a compressione monoassiale (Rc) per indicare la capacità portante (resistenza alla deformazione permanente) del materiale trattato. Si tratta di una misura importante, specie quando si tratta di stabilizzare materiale di qualità più scadente. Per un provino con diametro di 150 mm confezionato con il 100% dell'energia di costipamento prevista dalla prova Proctor modificata, è stato consigliato per la Rc un valore minimo di 700 kPa.

5.2.2.18 Rigidezza

Il modulo resiliente (MR) di un materiale stabilizzato con bitume può essere misurato in laboratorio, sottoponendo un provino ad una prova di carico ripetuto. La prova di trazione indiretta a 10 Hz e a 25 °C su provini Marshall (maturati ed essiccati) con diametro di 100 mm porta ai valori tipici riportati in tab. 5.7.

Tipo di materiale	Modulo resiliente (MPa)
RAP/aggregati lapidei frantumati (miscela 50:50)	2500 – 4000
Aggregati lapidei frantumati a granulometria assortita	2000 – 3000
Ghiaia naturale (IP < 10, CBR > 30)	1500 – 3000

tab.5.7 Range tipici dei moduli resilienti di materiali stabilizzati con bitume rilevati in laboratorio

Nota: Tali valori sono significativamente superiori a quelli determinati per mezzo di prove dinamiche triassali e flessionali, così come a quelli determinati mediante analisi a ritroso del bacino di deflessione. Ciò è dovuto primariamente alla

mancanza di umidità nei provini (ma anche alla geometria e allo stato tensionale indotto dalle condizioni di prova).

5.2.2.19 Tempo di lavorazione

Non esistono specifici limiti temporali per la lavorazione del bitume schiumato. Se il contenuto di umidità del materiale viene mantenuto prossimo al valore ottimale, il periodo di lavorazione può essere esteso.

5.2.2.20 Densità

Come già descritto in precedenza per i materiali trattati con cemento e con emulsioni bituminose, il costipamento dovrebbe sempre essere finalizzato a raggiungere la massima densità possibile nelle condizioni riscontrate in sito (la cosiddetta “densità in sito”). Viene normalmente specificata una densità minima come percentuale della densità AASHTO modificata. Per gli strati di base stabilizzati con bitume schiumato essa è normalmente compresa tra il 98% e il 102%. Talvolta è consentito un gradiente di densità, specificando una densità “media”. Ciò significa che la densità alla sommità dello strato può essere maggiore rispetto a quella nella parte inferiore. In tali casi è normalmente specificato anche uno scostamento massimo del 2% per la densità misurata nel terzo inferiore dello spessore dello strato. Quindi, se la densità media specificata è pari al 100%, la densità alla base dello strato dovrà essere superiore al 98%. Per aggregati di qualità migliore (ad es. con un indice di portanza CBR > 80%) è consigliabile specificare una densità assoluta come la “massa volumica apparente” o la “densità relativa apparente” dell’aggregato.

Capitolo 6

Macchinari utilizzati

6.1 Macchine gommata: WR 2000 e WR 2500 S



fig 6.1 WR2000



fig. 6.2 WR2500 S

Queste macchine sono impiegate prevalentemente per riciclare pavimentazioni stradali esistenti. Tali interventi interessano di solito gli strati superiori in conglomerato bituminoso e una parte dei sottostanti strati legati o non legati in misto granulare. Equipaggiate con due sistemi di pompaggio controllati da microprocessore e due barre spruzzatrici, come illustrato schematicamente in fig. 6.3, tali macchine sono riciclatrici ad alto rendimento in grado di applicare tutti i leganti comunemente usati.

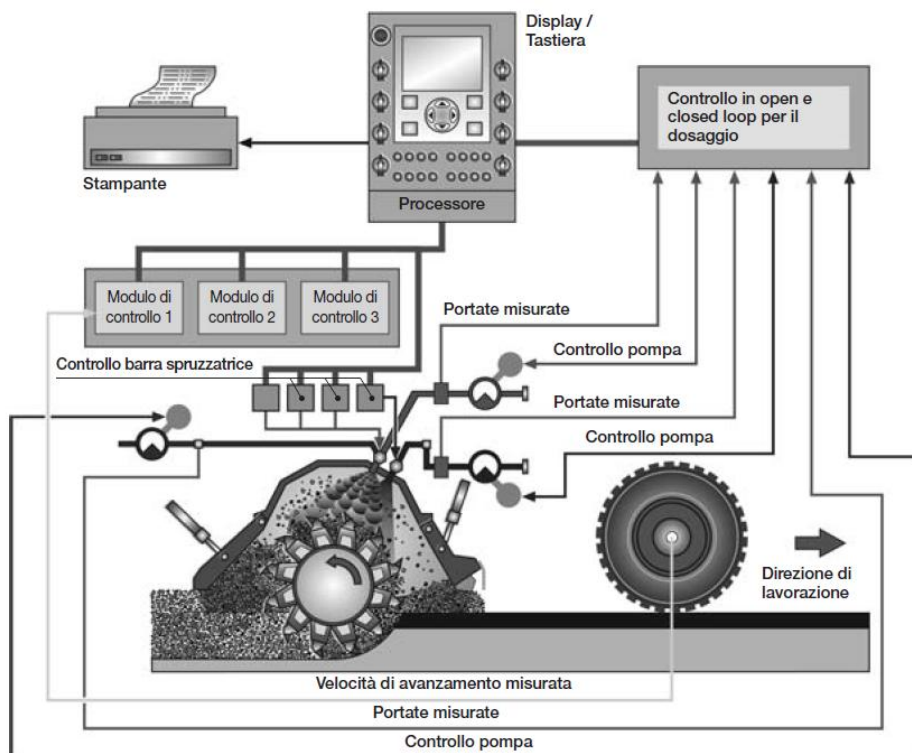


fig. 6.3 Controllo a microprocessore per i sistemi d'iniezione della WR2500 S

Grazie ai grandi pneumatici e alla trazione integrale di cui sono dotate, queste macchine sono inoltre capaci di stabilizzare anche terreni plastici da leggeri a molto pesanti. La stabilizzazione del suolo viene normalmente eseguita nel sottofondo della pavimentazione e si è rilevata essere una valida alternativa, in termini di costo e di tempo, alla sostituzione del terreno.

Le macchine possono essere impiegate anche per frantumare rocce tenere, ad es. calcare o scisto degradato dagli agenti atmosferici. Tali materiali provengono da sterri o da cave di prestito, vengono distribuiti in strati di spessore fino a 500 mm su un rilevato e prima di essere costipati vengono polverizzati da una riciclatrice fino ad ottenere un materiale di granulometria adeguata. Il sistema per l'aggiunta di acqua è ideale per aumentare il tenore di umidità e ottenere quindi il massimo costipamento di strati spessi. La WR 2500 SK è una versione ampliata della WR 2500 S, con un dispositivo integrato per lo spandimento di calce o cemento montato immediatamente davanti al cassone del rullo. Tale dispositivo consente di spargere i leganti pulverulenti senza che vi sia sviluppo di polvere, una caratteristica che acquista sempre più importanza in termini di accettabilità ambientale. Il campo d'azione della WR 2500 SK non è limitato alla sola stabilizzazione delle terre, ma si estende anche al riciclaggio di pavimentazioni stradali.

6.2 Macchine cingolate: 2200 CR e WR 4200

La 2200 CR è basata sulla fresa a freddo W 2200, una macchina grande ad alto rendimento. Se equipaggiata con l'intera gamma di sistemi di pompaggio e barre spruzzatrici, questa macchina può essere impiegata molto efficacemente per progetti di riciclaggio a freddo, specie laddove la pavimentazione esistente è costituita da spessi strati in conglomerato bituminoso. Inoltre la 2200 CR è solitamente equipaggiata con un banco di stesa che rende spesso superfluo profilare lo strato riciclato con la livellatrice.



fig. 6.4 Riciclatrice Wirtgen 2200 CR



fig. 6.5 Riciclatrice Wirtgen WR 4200

Le caratteristiche della WR 4200 comprendono:

- la massima larghezza operativa di 4,20 m permette di ripristinare l'intera larghezza di una carreggiata in una sola passata senza lasciare un giunto longitudinale;
- la larghezza operativa è variabile da un minimo di 2,80 m ad un massimo di 4,20 m e può essere impostata anche durante i lavori in corso;

- la miscela viene confezionata in un mescolatore forzato bialbero con una capacità di 400 t/h che raggiunge una qualità di miscelazione simile a quella degli impianti fissi;
- un banco di stesa, dotato sia di tamper che di vibrazione per la precompattazione, posa in opera il materiale riciclato nel pieno rispetto del profilo planoaltimetrico richiesto.

Questa riciclatrice mescola a fondo il materiale prelevato sull'intera larghezza di taglio. Il materiale polverizzato dai rulli di fresatura a larghezza variabile è quindi convogliato nel mescolatore forzato bialbero, dove viene miscelato con acqua e leganti, prima di tornare sotto forma di striscia sulla strada ed essere distribuito da una coclea. La configurazione della macchina è illustrata in fig. 6.6.

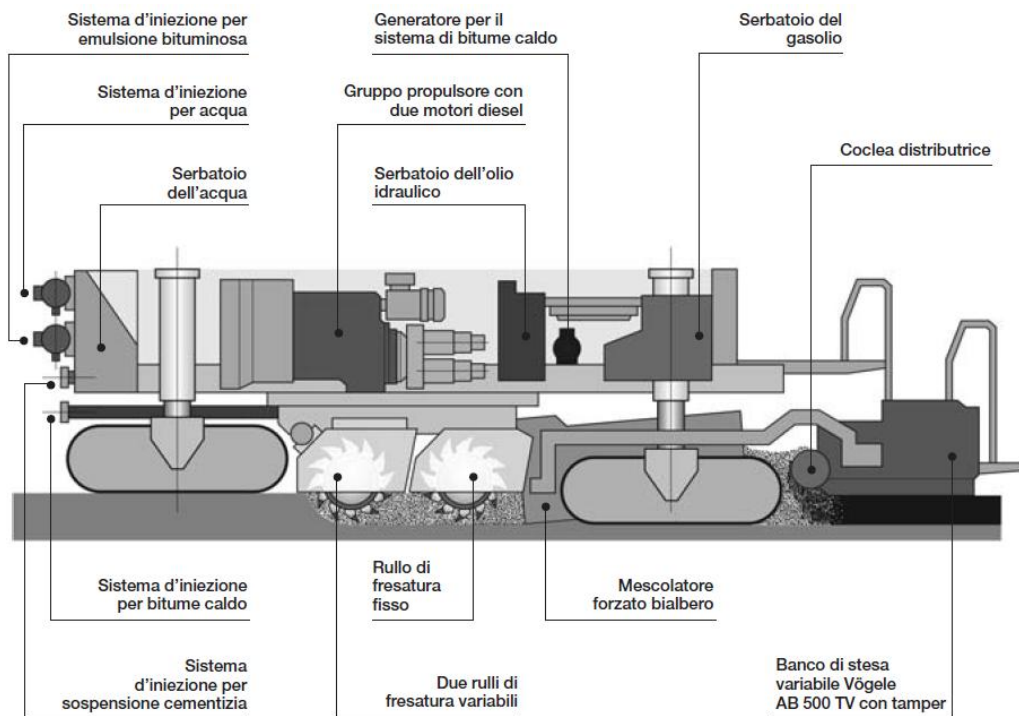


fig. 6.6 Configurazione macchina

6.3 Impianto mescolatore in-plant

L'impianto mescolatore KMA 200 per riciclaggio a freddo, illustrato in fig. 6.7, è stato concepito come impianto mobile ad alta produttività che può essere installato rapidamente in cantiere. L'impianto si compone di una tramoggia per il caricamento dei materiali inerti, di sistemi di pompaggio e barre spruzzatrici (per l'aggiunta di acqua, emulsione bituminosa e bitume schiumato), nonché di un mescolatore forzato bialbero con una produzione nominale di 200 t/h.



fig. 6.7 impianto mescolatore

L'impianto KMA 200 può essere usato per trattare un'ampia gamma di materiali per pavimentazioni, tra cui:

- materiale riciclato. Il fresato bituminoso e l'altro materiale recuperato da vecchie pavimentazioni può essere trattato con cemento, bitume schiumato o emulsione bituminosa per costruire nuovi strati di base. Ove necessario si possono mescolare aggregati di integrazione ai materiali riciclati per migliorarne le proprietà meccaniche;
- è possibile mescolare nuovi inerti con vari leganti (ad es. cemento, calce idrata, emulsione bituminosa, bitume schiumato ecc.) per produrre materiali di alta

qualità per la costruzione di nuovi strati di base. Si possono ad es. miscelare aggregati lapidei di frantumazione con cemento ed acqua per produrre calcestruzzo magro o calcestruzzo compattato con rullo;

- riutilizzo di fresato contaminato con catrame. Il riciclo di tali materiali in un processo di miscelazione a caldo è vietato per via dei fumi cancerogeni generati dall'emissione di idrocarburi poliaromatici. Inoltre il deposito di tale materiale è molto costoso a causa delle problematiche ecologiche correlate allo smaltimento del percolato che è classificato come rifiuto pericoloso. Il processo di riciclaggio a freddo in-plant è ideale per miscelare tale materiale contaminato con un prodotto bituminoso idoneo, che allo stato compattato può incapsulare durevolmente gli idrocarburi dannosi nello strato di base della pavimentazione stradale.

Le macchine descritte in precedenza possono essere usate per un grande numero di applicazioni diverse, che spaziano dagli strati di base per pavimentazioni soggette a carichi gravosi stesi con l'ausilio di una pavidmatrice/finitrice stradale fino alle pavimentazioni stese a mano con metodi ad uso intensivo di lavoro.

6.4 Attrezzature supplementari

Il miscelatore di sospensioni illustrato in fig. 6.8 è il modello WM 1000, che completa la gamma delle riciclatrici a freddo Wirtgen per l'aggiunta di cemento. La macchina è dotata di un serbatoio di cemento da 25 m³ e di un serbatoio d'acqua da 11.000 l. Il cemento viene trasportato da una coclea, pesato accuratamente mediante celle di carico e mescolato quindi con la quantità d'acqua necessaria per ottenere il tenore di umidità ottimale del materiale riciclato. La macchina ha una produzione massima di 1.000 litri al minuto di boiaccia cementizia, sufficiente per gran parte dei progetti di riciclaggio. La boiaccia viene pompata direttamente alla barra spruzzatrice inferiore montata sul vano di fresatura e miscelazione della riciclatrice, dove viene iniettata nel materiale polverizzato. Nella maggior parte delle applicazioni il miscelatore WM 1000 è posto immediatamente davanti alla riciclatrice nel treno di riciclaggio.



fig. 6.8 WM1000

Capitolo 7

Conclusioni

7.1 Vantaggi del riciclaggio a freddo

L'adozione del processo di riciclaggio a freddo per il ripristino di pavimentazioni offre, tra l'altro, i seguenti vantaggi evidenti:

- **Fattori ambientali.** Viene riutilizzato tutto il materiale della pavimentazione esistente. Non occorre quindi trovare apposite aree di deposito, e il volume del nuovo materiale d'apporto estratto da cave è ridotto al minimo. In tal modo si limitano le deturpazioni dell'ambiente inevitabilmente causate dall'apertura di cave a cielo aperto e di cave di prestito. Viene drasticamente ridotta anche

l'entità delle operazioni di trasporto. Il consumo globale di energia viene pertanto ridotto significativamente, così come l'azione deleteria sulla rete viaria dovuta al transito dei mezzi di trasporto.

- **Qualità dello strato riciclato.** Si ottiene una miscelazione di elevata e costante qualità dei materiali in sito con acqua e leganti. I sistemi di pompaggio controllati da microprocessore permettono un dosaggio preciso dei liquidi aggiunti. Il materiale riciclato e gli additivi vengono miscelati bene all'interno del vano di miscelazione.
- **Integrità strutturale.** Il processo di riciclaggio a freddo genera strati legati spessi ed omogenei che non contengono interfacce deboli fra gli strati più sottili della pavimentazione.
- **Minimo impatto sul sottofondo.** L'impatto sul sottofondo della pavimentazione è minimo rispetto a quello degli interventi di ripristino eseguiti con macchine operatrici convenzionali. Il riciclaggio a freddo è di norma un'operazione a singola passata. Usando una riciclatrice cingolata, i cingoli posteriori passano solo una volta sul sottofondo scoperto. Una riciclatrice gommata sparge il materiale dietro la macchina evitando quindi ogni contatto fra i pneumatici ed il sottofondo scoperto. (La rilavorazione del materiale della pavimentazione con macchinari convenzionali sottopone il sottofondo ad elevati carichi ripetuti. Ne possono conseguire deformazioni che rendono necessari scavi e riporti.)
- **Tempi di costruzione più brevi.** Le riciclatrici sono capaci di elevate produzioni giornaliere che accorciano in maniera significativa i tempi di costruzione, se paragonati agli altri metodi di ripristino. Tempi di costruzione più brevi riducono i costi di progetto, oltre ad offrire vantaggi immateriali per gli utenti della strada: vengono infatti ridotti al minimo i disagi arrecati dai lavori in corso.
- **Sicurezza.** Uno dei vantaggi più importanti è l'elevato grado di sicurezza della circolazione garantito da questo processo. L'intero treno di riciclaggio può operare su una sola corsia di marcia. Nel caso di strade a due corsie, ad esempio, l'intervento di riciclaggio può essere eseguito su una semicarreggiata durante il giorno e l'intera carreggiata, inclusa la corsia riciclata finita, può essere riaperta al traffico all'imbrunire.

- Efficacia in termini di costo. L'insieme dei vantaggi sopra descritti porta a ritenere il riciclaggio a freddo il processo più interessante, in termini di efficacia dei costi, per il ripristino delle pavimentazioni stradali.

7.2 Idoneità del processo di riciclaggio a freddo

Quando si prende in considerazione il ripristino di pavimentazioni stradali ammalorate, la scelta dei metodi di riparazione più efficaci in termini di costi dipende spesso dal progetto specifico. Ogni progetto è unico relativamente alla sovrastruttura esistente e alla qualità dei materiali costituenti i vari strati della pavimentazione. È pertanto importante individuare la soluzione più pratica e idonea ad ogni singolo progetto, tenendo conto dei seguenti fattori importanti:

- Ubicazione. La scelta della soluzione più adatta per un determinato Paese o regione dipende dalle condizioni ambientali locali e dal fatto che il progetto da elaborare riguardi una strada urbana a traffico elevato (nel qual caso si può operare soltanto di notte) o una strada rurale non asfaltata e poco trafficata che necessita di un trattamento di depolverizzazione a freddo. In questi due casi limite occorrono soluzioni e standard di servizio molto diversi. È importante informarsi circa le normative locali riguardanti la costruzione di strade e rendersi conto di quali siano le aspettative della popolazione locale rispetto ai livelli di servizio ritenuti da essa accettabili.
- Ambiente fisico. La topografia e la geologia vanno tenute in considerazione in sede di determinazione del metodo di ripristino più appropriato. In particolare, eventuali forti pendenze possono incidere in modo determinante sul tipo di costruzione che può essere eseguito in pratica. Il clima gioca un ruolo fondamentale nella scelta: le esigenze delle regioni desertiche a bassa piovosità saranno infatti diverse da quelle delle zone ad elevata piovosità. Anche l'effetto degli estremi termici, quale la fessurazione termica provocata dai cicli di gelo e disgelo, tenderà ad influire sulla scelta dell'approccio.
- Reperibilità dei materiali. L'attuabilità delle varie opzioni di riciclaggio è fortemente condizionata dalla reperibilità dei materiali, in particolare dei leganti. Questi ultimi devono essere disponibili in quantità tali da offrire uno standard

qualitativo costante e accettabile. Le riciclatrici utilizzano grandi quantità di leganti; è quindi indispensabile, nella fase iniziale, assicurarsi che i quantitativi necessari possano essere reperiti e trasportati senza inconvenienti.

Nell'ingegneria delle pavimentazioni il riciclaggio in profondità è un concetto relativamente nuovo che per l'economia di costi che offre andrebbe considerato sempre come un'opzione possibile.

7.3 Procedure di mix design

Confrontando le diverse procedure si può notare come le differenze principali risiedano nelle variabili considerate e nell'ordine in cui esse sono analizzate. In alcuni casi si fa riferimento all'ottimo di acqua (OWC) (Marshall-modificata e Superpave), mentre in altri all'ottimo della fase fluida totale (OFC) (Ministero dei LL.PP.; Wirtgen). Allo stesso tempo tutte fanno riferimento all'ottimo di emulsione bituminosa (OEC), ma con la differenza che in alcune è determinato nella prima fase, mentre in altre è relegato alla seconda.

Altro aspetto fondamentale è che alcune procedure considerano il cemento come un componente della miscela che può essere introdotto a piacimento nel rispetto di certi limiti. In particolare nella procedura del M.LL.PP. è consigliato l'incremento della quantità all'aumentare del contenuto di emulsione. Nella procedura Wirtgen sono dati dei valori indicativi e nelle procedure Marshall-modificata e Superpave il quantitativo di cemento da introdurre non è preso in considerazione.

Un particolare appunto va fatto nei confronti della procedura Superpave. Tale procedura è l'unica (eccetto quella sviluppata da noi) che prende in considerazione la Pressa Giratoria come strumento di compattazione. Nonostante questo, nulla è detto sul tipo di fustella da utilizzare (forata o chiusa). Una precisazione in questo senso sarebbe stata molto utile per capire se, in fase di determinazione dell'OFC, il RAP è da considerarsi come una terra sciolta o un conglomerato.

Purtroppo, l'assenza di una normativa unitaria specifica, comporta la presenza di decine di procedure di mix design tutte valide tra loro che nascono, però, da considerazioni e necessità spesso differenti.

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa delle procedure viste.

7.4 Prospetto riepilogativo: confronto fra cemento e leganti bituminosi

Stabilizzazione con cemento	
Vantaggi	Svantaggi
<p>Reperibilità. Il cemento è disponibile in tutto il mondo, confezionato sempre in sacchi e spesso alla rinfusa.</p> <p>Costo. Il cemento è relativamente più conveniente rispetto al bitume.</p> <p>Facilità di applicazione. Non avendo a disposizione spanditrici o miscelatori di sospensioni è sempre possibile spargere il cemento manualmente.</p> <p>Grado di accettazione. Il cemento è ben conosciuto nel settore delle costruzioni. Sono generalmente disponibili metodi standardizzati di prova e specifiche tecniche.</p>	<p>La formazione di fessure da ritiro è inevitabile, ma il fenomeno può essere ridotto al minimo.</p> <p>Aumenta la rigidità delle pavimentazioni flessibili.</p> <p>Richiede un'adeguata maturazione e protezione dal transito lento di veicoli pesanti.</p>

Stabilising with Bitumen Emulsion	
Vantaggi	Svantaggi
<p>Flessibilità. La stabilizzazione con bitume crea un materiale viscoelastico con migliori caratteristiche di flessibilità e di resistenza alla deformazione permanente.</p> <p>Facilità di applicazione. Un'autocisterna è agganciata alla riciclatrice e l'emulsione bituminosa viene iniettata per mezzo di una barra spruzzatrice.</p> <p>Grado di accettazione. Le emulsioni bituminose sono conosciute relativamente bene nel settore delle costruzioni. Sono generalmente disponibili metodi standardizzati di prova e specifiche tecniche.</p>	<p>Costo. Le emulsioni bituminose normalmente non sono fabbricate in loco. Il processo di fabbricazione richiede severi controlli di qualità. Gli emulsionanti sono costosi. Il costo di trasporto lievita perché oltre al bitume si deve trasportare in cantiere anche l'acqua.</p> <p>Se il contenuto d'umidità del materiale nella pavimentazione esistente è prossimo a wopt, l'aggiunta dell'emulsione ne determina la saturazione.</p> <p>La maturazione può richiedere molto tempo dal momento che l'aumento della resistenza dipende dalla perdita di umidità.</p> <p>Reperibilità. Può darsi che la formulazione richiesta per un'applicazione di riciclaggio non sia sempre disponibile.</p>

Stabilising with Foamed Bitumen	
Vantaggi	Svantaggi
<p>Flessibilità. La stabilizzazione con bitume crea un materiale viscoelastico con migliori caratteristiche di flessibilità e di resistenza alla deformazione permanente.</p> <p>Facilità di applicazione. Un'autocisterna è agganciata alla riciclatrice e il bitume caldo viene pompato ad un'apposita barra spruzzatrice, dove viene schiumato e iniettato nel vano di fresatura e miscelazione.</p> <p>Costo. Per la produzione di bitume schiumato si usa un bitume avente un indice di penetrazione standard. Non vi sono costi di produzione aggiuntivi.</p> <p>Velocità di aumento della resistenza. Il materiale può sopportare il carico del traffico subito dopo la posa in opera ed il costipamento.</p>	<p>Per la produzione di bitume schiumato il bitume deve essere molto caldo, solitamente oltre i 160 °C. Ciò richiede spesso appositi dispositivi di riscaldamento e l'adozione di misure di sicurezza aggiuntive.</p> <p>Tipo di materiale e relative condizioni. Il materiale saturo e il materiale caratterizzato da una carenza nella frazione inferiore a 0,075 mm non possono essere trattati con bitume schiumato senza opportuno pretrattamento o senza l'aggiunta di nuovo materiale.</p>

Conglomerati bituminosi tiepidi

Premessa

Le più recenti statistiche riferite alla produzioni di conglomerati bituminosi in Europa, mostrano dati meritevoli di analisi e riflessione. L'Italia, secondo produttore in Europa dopo la Germania e prima dalla Francia, ha prodotto negli anni 1999-2004 conglomerati bituminosi a caldo per un totale di 245 milioni di tonnellate, con una media annua di circa 40.7 milioni ed un trend annuale di crescita del 4%.

Il consumo di risorse naturali non rinnovabili necessario per la produzione di simili quantitativi di materiale, oltre al grande contributo di inerti e bitume, coinvolge ingenti

quantità di risorse energetiche quali carburanti, combustibili ed energia elettrica occorrenti per la produzione in impianto, per il trasporto e per la stesa.

Spinti anche dalle ricorrenti crisi petrolifere i settori più avanzati, impegnati nella realizzazione di pavimentazioni stradali si interrogano, da tempo, sui possibili processi mirati ad un significativo contenimento delle risorse energetiche coinvolte, possibile solo attraverso una drastica riduzione delle temperature operative.

Considerando che riduzioni di 10°C consentono, a parità di condizioni, di dimezzare le emissioni di fumi, ben si comprende come il risparmio energetico vada di pari passo con la salvaguardia dell'ambiente e con il miglioramento delle condizioni di lavoro.

Alla luce dei numeri in gioco chiaro come un contenimento, anche modesto, dell'energia occorrente nel processo di confezionamento può tradursi in un contributo radicalmente significativo al risparmio energetico, anche in considerazione degli importanti impegni che l'Italia ha assunto (protocollo di Kyoto) sotto il profilo della salvaguardia ambientale e della riduzione delle emissioni inquinanti in atmosfera.

Nell'ambito dei lavori del Comitato Tecnico Nazionale delle Pavimentazioni si è sottolineato l'accelerazione di recente registrata nello sviluppo di tecnologie per la produzione di conglomerati bituminosi confezionati con processi a bassa temperatura, denominati, WMA Warm Mix Asphalt.

Questa tesi si propone di fornire una descrizione sia dei principi alla base delle varie tecnologie, sia delle singole componenti di processo.

Si spazia quindi dalla semplice additivazione del bitume con specifici fluidificanti, in grado di ridurre efficacemente la viscosità in fase produttiva, all'utilizzo di schiuma di emulsione bituminosa fino all'impiego di due leganti rispettivamente a bassa ed alta penetrazione.

In merito ai processi, particolarmente efficace è poi il metodo francese del confezionamento di conglomerati denominati a bassa energia che, sfruttando al meglio la fluidità a caldo del bitume per rivestire gli inerti grossi e la sua attitudine a formare schiuma, che riveste le frazioni fini, propone una soluzione progettuale di sicuro interesse.

Ne deriva la possibilità concreta che il ricorso a miscele bituminose tiepide, confezionate a temperatura di decine di gradi inferiori a quelle della produzione a caldo, permetta di riesaminare profondamente le relazioni note tra la temperatura e le distinte fasi di

confezionamento trasporto e stesa di un conglomerato, espandendone potenzialità e modalità di realizzo.

Introduzione

L'esigenza primaria dei Gestori di Strade e Autostrade di contenere i costi di manutenzione continua ad impegnare l'industria legate al settore delle pavimentazioni nella ricerca e nella messa a punto di tecnologie sempre più efficienti per lo più indirizzate verso la riduzione dei consumi di energia e di risorse naturali non rinnovabili. Negli ultimi decenni le attese della società civile hanno tuttavia assunto un ruolo sempre più importante per ciò che attiene la salvaguardia dell'ambiente e la tutela della salute e della sicurezza sul posto di lavoro.

Tali attese sono sfociate in movimenti d'opinione talmente diffusi da contribuire in maniera determinante al varo di dispositivi normativi e giuridici a livello nazionale ed internazionale.

Un esempio per tutti è il protocollo di Kyoto, il cui rispetto dovrebbe rappresentare un impegno primario non solo per i paesi firmatari, che peraltro affrontano il tema con un rigore estremamente variabile, ma per tutta la comunità internazionale.

In questo ambito acquistano particolare risalto i problemi legati all'effetto serra ed alla riduzione delle emissioni di CO₂ che inevitabilmente si associano ad ogni attività industriale.

A conferma dell'importanza assunta da queste problematiche si sottolinea che l'Europa sta tralasciando una riduzione delle emissioni del 15% entro il 2010, mentre alcune singole nazioni si sono poste obiettivi ancora più ambiziosi, come ad esempio la Germania che si è impegnata a ridurre le emissioni del 20% entro il 2005.

Ciò fa comprendere come ed in che misura l'intervento delle istituzioni sia in grado di influire sull'avvio di processi di modifica delle attività produttive con l'obiettivo di renderle più efficienti attraverso l'innovazione.

Il tutto si inquadra in una visione globale che tenga conto delle esigenze del cittadino oltre che degli interessi specifici dell'industria attraverso valutazioni fondate su analisi tecnico-economiche comprensive di tutte le problematiche in essere.

In Germania per bene inquadrare il problema degli aspetti ambientali connessi ai fumi del bitume fu costituito nel 1997 il Bitumen Forum con la partecipazione di tutti gli attori, pubblici e privati, coinvolti a qualsiasi titolo nell'industria dell'asfalto (Ministeri, Associazioni Industriali, Sindacati dei Lavoratori ...).

Nell'ambito del Forum furono avviati diversi studi su questa materia con importanti obiettivi tra cui la promozione di miscele bituminose "tiepide" in grado di abbattere l'emissione di fumi del bitume attraverso la riduzione delle temperature operative in impianto e durante la posa in opera.

A carico del Bitumen Forum vi è inoltre un contributo fattivo allo svolgimento di uno studio epidemiologico sul bitume svolto nel medesimo periodo dalla EU.

Un altro esempio di iniziative allargate alle varie componenti del settore riguarda l'Olanda, dove nel 2002 fu firmato un' Accordo di Lungo Termine tra alcuni Ministeri e l'industria.

Si tratta di un documento impostato su una politica di conservazione energetica nato agli inizi degli anni '90 e rinnovato alla luce dell'impegno di abbattere del 6% le emissioni di gas serra tra il 2008 e il 2012 assunto dall'Olanda nell'ambito degli accordi del Protocollo di Kyoto.

L'industria legata al mondo delle strade sta quindi proponendo diverse soluzioni tecnologiche che, sebbene in attesa di conferme sul campo dal punto di vista della durata delle prestazioni nel tempo, si possono considerare come risposte adeguate e con ulteriori margini di miglioramento alle problematiche sopra esposte.

Si pensi ad esempio ai conglomerati a freddo ed ai processi di riciclaggio delle pavimentazioni, in special modo quelli a freddo ed in sito, dove la nuova miscela viene prodotta sul posto mescolando senza apporto di calore il materiale fresato con idonei leganti, quali il bitume schiumato o le emulsioni di bitume modificato, ed opportuni additivi chimico-funzionali.

Fermo restando il ruolo chiave assunto dalle tecniche di riciclaggio, l'obiettivo del presente lavoro è quello di fornire una trattazione il più possibile esaustiva della tecnologia di produzione dei conglomerati bituminosi per via tiepida.

Le tecniche tradizionali di riciclaggio a freddo con emulsioni e schiume di bitume, note ed usate da lungo tempo, non verranno pertanto considerate in questa sede sebbene facciano parte integrante dello scenario descritto.

La ricorrente “crisi” petrolifera, attualmente in una fase particolarmente onerosa e prolungata, impatta sulle tecniche tradizionali basate su cospicui conferimenti di energia termica e costituisce un ulteriore impulso verso la ricerca di processi mirati ad una drastica riduzione delle temperature operative.

Considerando che riduzioni di 10°C dimezzano le emissioni di fumi si comprende come queste tecniche, oltre a realizzare risparmi energetici, possano contribuire a salvaguardare l’ambiente ed a migliorare le condizioni di lavoro.

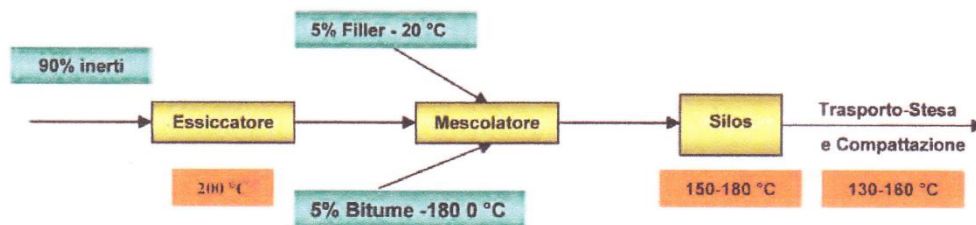


Fig. 1: Schema di confezionamento delle miscele con processo a caldo HAM

Si definisce WMA (Warm Mix Asphalt, traducibile in Miscela Bituminosa Tiepida), il conglomerato bituminoso ottenuto da processi in cui le temperature risultano di decine di gradi inferiori a quelle tipiche delle tecniche di produzione a caldo (HMA Hot Mix Asphalt).

La riduzione delle temperature in gioco presenta il vantaggio di abbattere non solo il consumo di carburante ma anche l’emissione dei fumi, che a temperature più basse possono essere praticamente eliminati insieme agli odori che vi si associano.

Questo ultimo aspetto, di per sé importante, assume una rilevanza ancor più marcata in zone quali gli ambienti urbani dove le prescrizioni di legge in materia di qualità dell’aria risultano particolarmente severe.

Le tecnologie di produzione delle WMA, oggetto di numerose sperimentazioni all’estero, stanno cominciando a riscuotere un certo interesse anche sul mercato italiano, motivo per cui si ritiene che il presente contributo possa essere utile a diffonderne le relative conoscenze.

Capitolo 1

Tipologie di processo

Generalità

Prima di analizzare in dettaglio gli aspetti tecnici si riportano una serie di considerazioni relative alle modalità di produzione dei conglomerati bituminosi che serviranno a mettere in luce gli aspetti particolari delle diverse tecnologie.

Il confezionamento di un conglomerato bituminoso si può effettuare con tecniche sperimentate da decenni che possono implicare il conferimento di energia termica o escludendo, in tutto o in parte, e per questo si parla di tecniche “a caldo” o “a freddo” .

Le tecniche definiscono automaticamente la tipologia del legante che a caldo è bitume, tal quale o modificato, portato a temperature di 160-180° C, mentre a freddo è un'emulsione di bitume, tal quale o modificato, impiegata a temperatura ambiente.

Negli ultimi tempi però si sono sviluppate tecnologie che mettono in crisi l'abituale suddivisione schematica freddo-caldo; a tale riguardo basti pensare alla tecnica che impiega il bitume schiumato, comunemente annoverata tra quelle a freddo nonostante si proceda al riscaldamento a 170-180° C del legante e, in taluni casi, anche al riscaldamento degli aggregati.

La necessità di procedere ad una diversa classificazione delle tecnologie scaturisce dalle numerose soluzioni messe a punto per contenere le temperature di confezionamento delle miscele. Negli anni più recenti, infatti, alle tecnologie tradizionali si sono aggiunte miscele a bassa energia, additivi fluidificanti, bitume schiumato, emulsioni di bitume schiumato, bitume schiumato con aggregati riscaldati ecc.

All'ampia gamma di processi disponibili corrispondono molteplici applicazioni e differenti prestazioni.

Lo schema di Fig. 2 e Fig. 3 , oltre a proporre un sistema di classificazione delle tecnologie WMA, rappresenta la possibilità di impostare le temperature a partire dai due estremi (tecnologie a caldo e a freddo) ricorrendo agli adattamenti necessari per la produzione di miscele che consentono risparmi energetici ed abbattimenti delle emissioni.

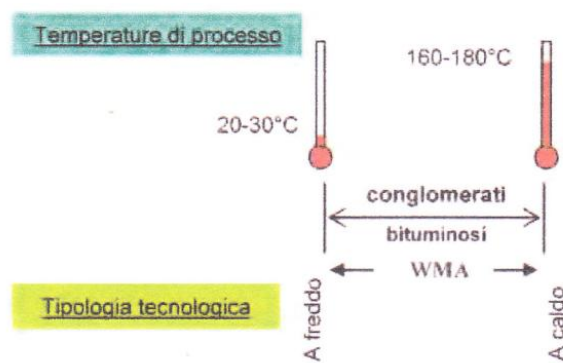


Fig. 2: Schema delle temperature di processo per conglomerati bituminosi a freddo e a caldo

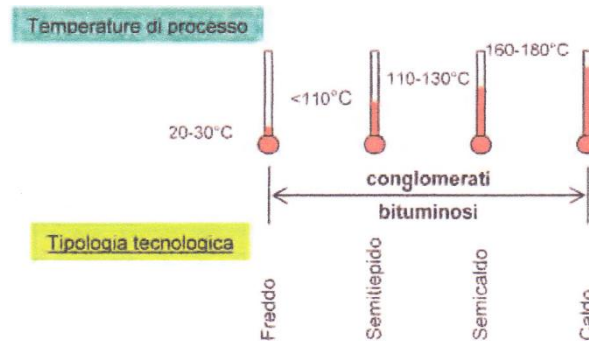


Fig. 3: Schema delle temperature di processo per conglomerati bituminosi

Il confezionamento a caldo avviene in impianti in cui si raggiungono temperature non inferiori a 150-180°C (schema di Fig.1), per non parlare poi di miscele speciali come l'asfalto colato o il gussasphalt per le quali si raggiungono i 250°C.

Dette temperature si rendono necessarie per la completa essiccazione degli aggregati al fine di evitare che l'umidità residua possa determinare, nel medio-lungo termine, la perdita di adesione tra bitume ed aggregati.

Inoltre le elevate temperature, abbassando la viscosità del bitume, rendono possibile il completo rivestimento degli inerti e conferiscono alla miscela l'adeguato grado di lavorabilità necessario per le successive operazioni di stesa e compattazione.

Qualora sul cantiere si sia seguita la migliore pratica esecutiva la miscela, una volta raffreddata, sarà in grado di raggiungere il livello prestazionale richiesto

Le tecnologie di confezionamento a freddo si caratterizzano invece per i ridotti consumi energetici ed i bassissimi livelli di emissioni e si basano sull'impiego di emulsioni bituminose in grado di veicolare, a temperatura ambiente, il bitume tra gli aggregati.

Un aspetto critico di questa tecnica è che il rivestimento degli inerti inizia solo dopo la "rottura" dell'emulsione e pertanto il raggiungimento delle adeguate caratteristiche meccaniche necessita di un periodo di maturazione della miscela che può durare anche dei mesi.

Una tecnologia a freddo ma che sarebbe più appropriato includere tra quelle tiepide, è quella che utilizza il bitume schiumato, che come è noto si ottiene iniettando all'interno di apposite camere di espansione dell'acqua fredda nebulizzata in un idoneo bitume preventivamente riscaldato a 170°C.

La formazione di schiuma garantisce l'effetto legante, che manifestandosi immediatamente e per contatto puntuale tra gli aggregati non presenta le criticità legate ai meccanismi di rottura e di maturazione tipici delle emulsioni bituminose.

Pertanto una volta terminata la compattazione è possibile una rapida rimessa in servizio anche in presenza di traffico pesante.

A questo punto sorge spontanea la domanda sul perché avendo già a disposizione le tecniche a freddo la ricerca si stia orientando verso le soluzioni tiepide che mirano ad abbassare solo di qualche decina di gradi le temperature tipiche dei processi a caldo. Fermo restando l'inveterato atteggiamento di conservatorismo tecnologico di molti operatori del settore, la risposta al quesito va ricercata nel fatto che ogni innovazione tecnologica deve fare i conti con la ricerca a caldo tradizionale.

Il livello qualitativo delle miscele a caldo ottenuto seguendo protocolli sperimentati e consolidati da decine di anni costituisce, infatti, un vero e proprio riferimento assoluto. Nel caso specifico delle tecnologie a freddo manca inoltre la verifica del "fattore tempo", ovvero la conoscenza dell'effettiva durata delle miscele prodotte, contrariamente a ciò che avviene per i tradizionali conglomerati a caldo le cui leggi di decadimento sono ormai ben note.

Uno degli aspetti critici connessi alla durata delle miscele a freddo si deve al fatto che il legante può non rivestire adeguatamente gli aggregati.

Spesso infatti l'emulsione bituminosa non riveste completamente le pezzature più grossolane dell'aggregato mentre il bitume schiumato risulta particolarmente efficace solo sulle frazioni fini.

Con la messa a punto delle miscele "tiepide" si hanno una serie di vantaggi di cui i più immediati riguardano il risparmio energetico e la conseguente riduzione del consumo di combustibile che, come è noto, rientra tra le risorse non rinnovabili.

Altro vantaggio è, come più volte citato, l'abbattimento delle emissioni sia presso l'impianto di produzione che sul cantiere reso ancora più evidente se si considera che la riduzione delle temperature influisce non solo sulla quantità dei fumi emessi ma anche sulla loro composizione.

La diminuzione delle temperature comporta anche una minore usura dei mezzi utilizzati nell'ambito del processo di produzione.

In virtù delle basse temperature operative all'impianto il fenomeno di invecchiamento del bitume, associato alla sua ossidazione ed alla perdita di sostanze aromatiche, risulta estremamente contenuto.

Da questa ultima considerazione si comprende facilmente come e perché le miscele tiepide possano presentare prestazioni migliori in termini di durata dei tempi.

Le considerazioni precedenti lasciano intravedere diverse possibili ricadute positive sulla gestione dei cantieri per la costruzione/manutenzione di pavimentazioni, ovvero:

- estensione del periodo lavorativo anche nelle stagioni meno calde;
- a parità di temperatura finale, copertura di maggiori distanze di trasporto del materiale proveniente dagli impianti di confezionamento;
- riduzione dei tempi di attesa per l'apertura al traffico di tratti di pavimentazione appena messa in opera.

Le ricerche condotte a partire dalle fine degli anni 90 in Europa e negli Stati Uniti, hanno avuto come risultato una serie di tecnologie per la produzione di WMA che si riconducono a processi brevettati.

Si riporta di seguito una possibile classificazione delle tecniche tiepide basate su due differenti modalità di processo:

Additivazione con fluidificanti del bitume	Formazione di schiuma di bitume
N.B. Una ulteriore suddivisione potrebbe essere effettuata sulla base delle sostanze usate, ma queste non determinano modifiche sostanziali alle tecniche	<ul style="list-style-type: none"> • Schiuma di emulsione bituminosa • Bitume schiumato con aggregati riscaldati • Sistema a due componenti di legante • Conglomerati a bassa energia • Additivazione con zeoliti

tab. 1 Classificazione delle tecnologie per il confezionamento di miscele tiepide

Capitolo 2

Descrizione delle tecniche WMA

2.1 Additivazione con fluidificanti del bitume

Nella fase iniziale della ricerca sulle tecniche “tiepide” vi fu tra le varie opzioni un orientamento a favore dell’impiego di sostanze organiche solubili nel bitume atte a modificarne le caratteristiche reologiche in funzione delle variazioni di temperatura. La maggioranza di tali additivi è costituita da paraffine o cere cristalline che agiscono in base al meccanismo della fusione cristallizzazione:

- fondendo al di sopra di 80°C riducono la viscosità del legante e conferiscono fluidità alle temperature di confezionamento e stesa dei conglomerati,
- cristallizzando al di sotto degli 80°C conferiscono rigidità anche a temperature di esercizio elevate

Le attività in laboratorio sono state corredate da applicazioni sul campo finalizzate ad ottenere miscele “tiepide” con prestazioni del tutto simili o superiori a quelle dei tradizionali conglomerati a caldo, specie per quanto riguarda la resistenza a fatica, la resistenza alle deformazioni permanenti e la lavorabilità sul cantiere (temperature di compattazione 100-120°C).

Tali agenti fluidificanti includono le paraffine Fischer-Tropsch, esteri acidi Montan, esteri acidi carbossilici della lignite a lunga catena lineare (C₂₈), altri derivati da acidi grassi, polietilene a basso peso molecolare.

La caratteristica principale che governa il meccanismo di modifica del bitume è il punto di fusione che, a seconda dell'origine della cera e della sua composizione chimica, può variare tra 80° C e 140°C.

Tra gli additivi più promettenti testati in Germania vi sono le cere paraffiniche di sintesi, caratterizzate da idrocarburi alifatici con catena lunga, che si formano nella fase di gassificazione del carbone nel processo Fischer-Tropsch per la produzione di carburanti e combustibili liquidi.

Tale tecnica, messa a punto all'inizio del secolo scorso, fu sviluppata nel corso della seconda guerra mondiale quando la Germania nazista priva di risorse petrolifere riuscì a far fronte per sei anni alle necessità dettate dallo sforzo bellico, grazie ai carburanti ed ai combustibili derivati da questo processo.

Con la conclusione della II guerra mondiale il processo Fischer-Tropsch fu abbandonato per essere successivamente ripreso in Sudafrica dove, a causa della politica di apartheid e delle conseguenti sanzioni, il suo utilizzo consentì di sopperire anche in questo caso alla mancanza di risorse derivate dal petrolio.

Il processo originario ha subito nel tempo modifiche e adattamenti per cui dal gas naturale e da combustibili non fossili è oggi possibile ricavare carburanti sintetici privi di zolfo e di frazioni idrocarburiche aromatiche praticamente privi di contributo all'emissione di CO₂.

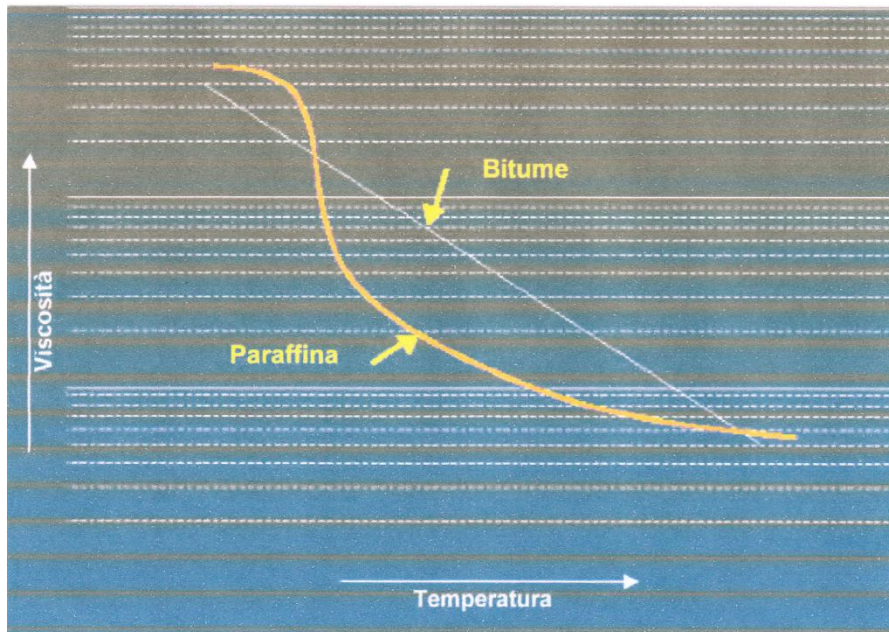


Fig. 4: Viscosità in funzione della temperatura di un bitume tal quale e di bitume additivato con paraffina

Dal punto di vista ambientale va anche sottolineato il fatto che questi biocarburanti (diesel e benzine) non danno contributi all'emissione di CO₂ in quanto il carbonio interessato rientra nel ciclo biologico delle sostanze vegetali utilizzate nel processo di trasformazione .

L'additivazione al bitume, sia modificato che tal quale, viene fatta alla temperatura di circa 120°C sotto modesta agitazione per meno di due ore e senza la necessità di un miscelatore ad elevata azione meccanica.

Il dosaggio delle paraffine raccomandato varia tra 2-4% in peso sul legante.

L'aggiunta dell'additivo comporta una serie di effetti sul comportamento reologico del bitume finale:

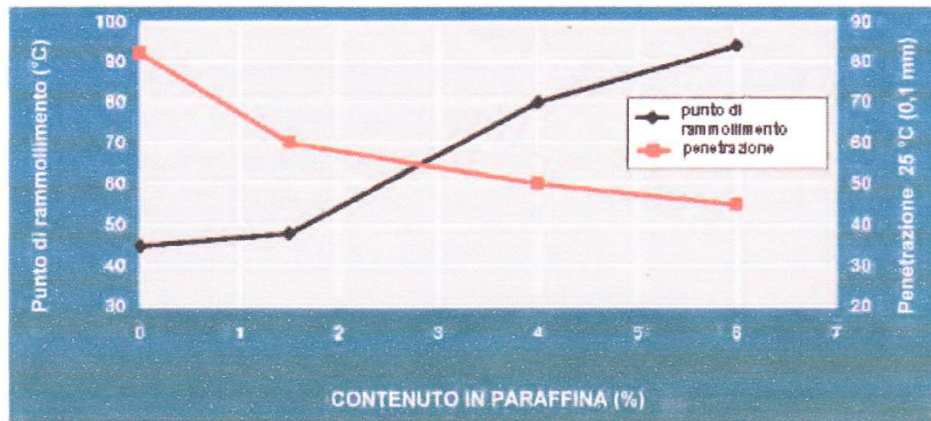


Fig. 5: Bitume 70/100 - Punto di Rammollimento e Penetrazione in funzione del contenuto in paraffina

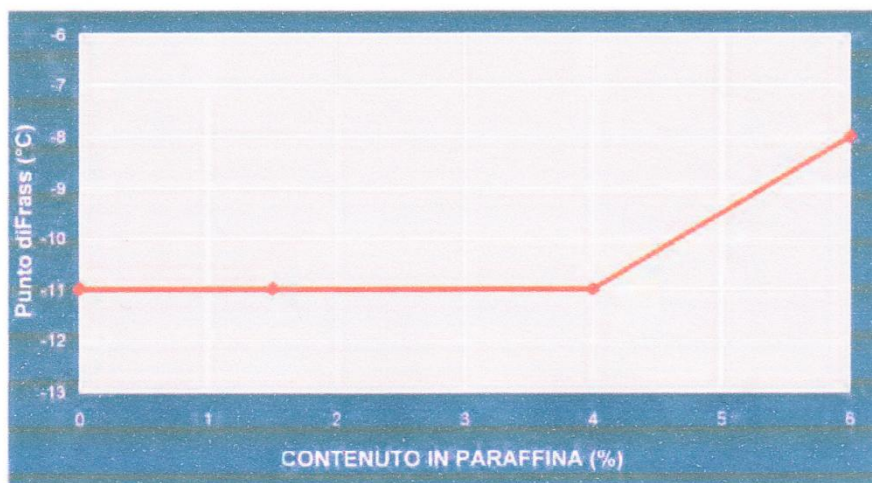


Fig. 6: Bitume 70/100 - Punto di Frass in funzione del contenuto in paraffina

- un effetto fluidificante con diminuzione della viscosità dinamica al di sopra di 130°C che favorisce il rivestimento degli aggregati e la lavorabilità;
- un effetto irrigidente con innalzamento del punto di rammollimento (Palla-Anello), una diminuzione della penetrazione a 25°C e maggiori moduli misurati con Dynamic Shear Rheometer;
- nessun effetto significativo alle basse temperature, come risulta dalla determinazione del punto di rottura Fraass. Mediante l'uso del Bending

Rheometer il 4% di FT si è dimostrato un valore di soglia oltre il quale può aversi un effetto negativo.

L'uso delle paraffine nella formulazione dei conglomerati bituminosi potrebbe sembrare, ad una prima analisi, del tutto illogico, visto che alcune normative prevedono limiti al contenuto di paraffine naturali nel bitume (in genere non superiore al 2%).

Le paraffine naturali presenti nel bitume hanno un numero di atomi di carbonio compreso inferiore a 45 e presentano una temperatura di fusione compresa tra 45 e 70°C mentre le paraffine ottenute con il processo Fischer-Tropsch contengono idrocarburi con catene più lunghe fino a 100 atomi di carbonio.

Attraverso processi di ricristallizzazione finalizzati ad elevare il punto di fusione si può fare in modo che esse mantengano la loro consistenza fino a 90-100°C.

Al di sopra dei 100°C si ha pertanto la fusione e la successiva riduzione della viscosità del bitume che rende possibile la miscelazione con gli inerti in un intervallo di temperature inferiori a quelle raggiunte con le tecniche tradizionali.

Nella tabella successiva si riporta un confronto tra valori rappresentativi delle paraffine naturali del bitume e da processo Fischer-Tropsch

Caratteristica	Cere da bitume	Cere da FT
Punto di fusione	50÷70	90÷110
Penetrazione a 25°C, 0.1 mm	100÷130	≤1
Peso molecolare medio, g/mole	300	1600
N-Paraffine, %	15÷20	70÷75

tab. 2 Caratteristiche delle cere di bitume e cere FT

A temperature inferiori al punto di fusione le paraffine formano una struttura tipo lattice all'interno del bitume ed a ciò è attribuibile il miglioramento delle prestazioni meccaniche del conglomerato, soprattutto in termini di resistenza alle deformazioni permanenti.

Il tenore di paraffina varia da un minimo del 3% in peso sulla miscela fino ad un massimo del 4% valore che si consiglia di non superare per evitare problemi di suscettibilità in presenza di elevate temperature.

E' opportuno mescolare le paraffine direttamente col bitume in quanto l'aggiunta di questi prodotti direttamente negli impianti di produzione non è consigliabile ai fini dell'ottenimento di una miscela omogenea.

Con questo processo le temperature del processo produttivo si riducono di almeno 10°C. In questa categoria rientrano anche tecnologie che impiegano composti esterificati a basso peso molecolare derivati principalmente di esteri di grassi paraffinici.

2.2 Formazione di schiuma di bitume

2.2.1 Schiuma di Emulsione Modificata

L'impiego delle emulsioni è tipico delle tecnologie a freddo per il confezionamento dei conglomerati bituminosi e dei processi di riciclaggio in sito delle pavimentazioni stradali.

I risultati ottenibili risultano estremamente interessanti dal punto di vista della riduzione dei consumi energetici.

Con l'avvento delle emulsioni elastomerizzate e sovrastabilizzate tale tecnica si è rilevata idonea anche nel caso di interventi su strade soggette a traffico pesante.

Il vantaggio di fondo delle tecnologie a freddo sta nella capacità di veicolare il legante bituminoso (emulsionato o schiumato in presenza di acqua) garantendo il ricoprimento degli inerti freddi senza alcun apporto di calore.

Il processo di produzione di miscele tiepide con emulsioni schiumate è stato concepito con lo scopo di ottimizzare le proprietà del bitume schiumato e delle emulsioni bituminose al fine di ottenere un prodotto finale che garantisca prestazioni vantaggiose rispetto a quelle offerte dalle miscele tradizionali a caldo.

Le emulsioni bituminose si ottengono mediante una intensa azione meccanica di miscelazione tra bitume ed acqua in un mulino colloidale, previa aggiunta di una sostanza emulsionante che agevoli la dispersione del bitume nella fase acquosa.

Un'emulsione bituminosa, tipicamente costituita per il 60% da bitume e per il 40% da acqua, è liquida a temperatura ambiente e pertanto può essere miscelata agli aggregati freddi.

Per ricomporre la fase liquida continua le gocce di bitume debbono fondersi tra loro (coalescenza) dopo che il fenomeno di rottura si sia innescato, ossia dopo che l'emulsione sia divenuta instabile.

I tempi necessari per la rottura di una emulsione ne fissano le caratteristiche applicative: emulsioni a rottura rapida verranno utilizzate nei trattamenti superficiali, mentre per riciclaggi in sito occorrono emulsioni a rottura più lenta.

Una volta completamente "maturato" il prodotto finale si presenta come un materiale dotato di sufficiente flessibilità, resistenza alla fatica ed all'azione dell'acqua.

Per garantire tali risultati le emulsioni bituminose debbono essere formulate in modo tale da renderle compatibili con gli aggregati (nuovi o fresato) e tale che il tempo di rottura sia idoneo a consentire la miscelazione e la successiva compattazione.

Inoltre l'umidità nella miscela deve essere ben controllata in quanto un suo eccesso implica il rischio di una rottura impropria oltre a pregiudicare le caratteristiche meccaniche. Questo ultimo fenomeno può essere ridotto o eliminato mediante aggiunta di legante idraulico (cemento Portland) in grado di interagire con l'acqua libera presente nella miscela.

La schiumatura del bitume si ottiene mediante il suo riscaldamento a 180°C in un impianto pressurizzato e successiva immissione nella camera di espansione di una piccola quantità di acqua (2-3% in peso sul bitume). Una volta andata in ebollizione l'acqua consente al bitume di espandersi dando luogo alla formazione di schiuma con aumento di volume fino a 15 volte quello originario.

La schiuma di bitume rimane stabile per un lasso di tempo che varia tra 20 e 50 secondi sufficiente a consentire il rivestimento degli aggregati.

Dalla camera di espansione il bitume schiumato viene iniettato attraverso un ugello direttamente sugli aggregati freddi.

La tecnica in esame non richiede una particolare compatibilità con gli inerti per assicurare un adeguato tempo di rottura dell'emulsione. La miscela finale è contrassegnata da un rapido accrescimento delle caratteristiche di resistenza.

La presenza di acqua nella schiuma e/o l'uso di aggregati freddi e umidi spesso comportano la necessità di additivare il bitume con un dop di adesione.

La produzione di miscele con bitumi schiumati richiede che il legante sia molto caldo e che nel materiale da stabilizzare vi sia una quantità sufficiente di frazione (5-15% di passante a 75 μ) tale da garantire un rivestimento più efficace grazie alla formazione di una malta con funzione collante.

La tecnologia di produzione delle miscele tiepide che comporta l'uso del legante sotto forma di schiuma di emulsione bituminosa costituisce un ibrido rispetto alle due precedentemente elencate.

Il bitume viene riscaldato tra 120 e 130°C e successivamente, attraverso un ugello, spruzzato nel miscelatore, direttamente sugli inerti che non necessitano di alcun riscaldamento.

Il processo è stato simulato in laboratorio, dove sono state verificate le prestazioni di miscele tiepide confezionate con emulsione schiumata confrontandole con quelle delle miscele tradizionali a caldo. Per la formulazione in laboratorio sono stati impiegati aggregati con granulometria conforme alle specifiche tecniche inglesi per strati di base e provenienti da tre formazioni geologiche diverse, una delle quali molto prossima al materiale fresato.

Come legante da sottoporre alla schiumatura è stata utilizzata una emulsione al 67% di bitume.

Le miscele sono state compattate a diversi tenori di legante mediante pressa giratoria alla temperatura di 85°C.

Analogha procedura è stata adottata per la formulazione delle miscele a caldo (170°C) con impiego dello stesso bitume di base 8/120 presente nelle emulsioni.

Le prove di compattazioni hanno mostrato valori simili della percentuale dei vuoti e della densità massima per entrambi i tipi di miscela.

Le prove a trazione indiretta hanno mostrato prestazioni migliori per le miscele a caldo rispetto a quelle tiepide realizzate con emulsione schiumata; i risultati per la miscela contenente l'aggregato di granulometria simile al fresato differiscono solo del 10% rispetto a quelli delle miscele a caldo.

Le prove di suscettività dell'acqua, valutate con prove di resistenza condotte dopo cicli successivi di immersione, indicano che le miscele con maggiori contenuti di legante mostrano una minore riduzione della resistenza.

La capacità di resistere alle deformazioni permanenti è risultata per le WAM meno buona di quella delle miscele a caldo, ma pur sempre accettabile.

In conclusione gli accertamenti di laboratorio indicano che le miscele tiepide con emulsioni schiumate raggiungono un livello prestazionale iniziale di poco inferiore a quello delle miscele a caldo ma suscettibile di miglioramento con il passare del tempo. Al termine degli studi in corso per ottimizzare il mix design e delle prove su strada tese a valutare le caratteristiche di resistenza dopo un adeguato tempo di maturazione sarà possibile esprimere un giudizio più ponderato sulle potenzialità di impiego della tecnologia descritta.

2.2.2. Bitume Schiumato ed Aggregati Riscaldati

Questa tecnologia è il risultato di un lavoro di ricerca congiunto tra tecnici sudafricani ed olandesi e rappresenta l'evoluzione del processo di stabilizzazione con bitume schiumato brevettato nel 1957 dal Prof. Csany.

Essa può essere definita come tecnica di confezionamento di conglomerati bituminosi con bitume schiumato ed aggregati riscaldati e costituisce un esempio tipico delle già citate modalità semitiepide.

Sulla base dell'esperienza acquisita nell'utilizzo della tecnologia del bitume schiumato è noto che la temperatura degli aggregati durante la lavorazione ha un ruolo molto importante ai fini delle prestazioni del prodotto finale.

Per lungo tempo ci si è preoccupati del rapporto tra temperatura minima degli inerti quella dell'ambiente mentre sono stati trascurati i potenziali vantaggi derivanti da un riscaldamento preliminare, anche moderato, degli aggregati.

La ricerca mirava a valutare le prestazioni in termini di rivestimento degli inerti, compattazione e caratteristiche meccaniche di miscele semitiepide formulate con aggregati riscaldati a temperatura inferiori ai 100 prima dell'immissione del bitume schiumato.

L'entità del risparmio energetico dovuto alle minori temperature di riscaldamento degli aggregati dipende dal contenuto di umidità negli aggregati stessi e può oltrepassare la soglia del 40%. I risultati dello studio si possono sintetizzare nei seguenti punti:

- l'efficacia del ricoprimento degli aggregati da parte del legante aumenta con la temperatura degli aggregati stessi;

- è opportuno conferire umidità alla miscela per facilitare la compattazione .
L'indice dei vuoti può diminuire del 30% se la temperatura di compattazione varia tra 45 a 90°C;
- le miscele semitiepide con bitume schiumato raggiungono resistenze a compressione più elevate rispetto a quelle ottenute a temperatura ambiente. Nel confronto con le miscele a caldo i valori di resistenza diventano compatibili quanto più diminuisce il divario tra le temperature di confezionamento. Valutazioni analoghe valgono per la resistenza al taglio;
- l'energia necessaria alla rottura a compressione o a taglio evidenzia un comportamento simile a quello delle miscele tradizionali a caldo.
La presenza del fresato conferisce migliori caratteristiche di resistenza al taglio rispetto a miscele formulate con inerti vergini;
- la resistenza a fatica è equivalente a quella delle miscele tradizionali a caldo;
- per temperature di riscaldamento degli inerti superiori ai 100°C si ottengono maggiori resistenze a taglio, ma diminuiscono ovviamente i vantaggi energetici;
- il tasso di umidità finale della miscela dipende dalle condizioni degli aggregati in cumulo, dalla durata del loro riscaldamento e dal tempo intercorso tra le fasi di confezionamento e posa in opera

La differenza sostanziale tra i conglomerati con schiumato a freddo, semicaldo e quelli a caldo sta nell'umidità e nella temperatura di produzione.

L'umidità nello schiumato a freddo disperde il bitume in forma di filamenti piuttosto che in modo continuo. Ovviamente questo determina diverse caratteristiche del mastice di bitume.

Per quanto riguarda invece il conglomerato con schiumato semicaldo la temperatura di miscelazione degli aggregati influenza la distribuzione del bitume e quindi il rivestimento e la coesione degli inerti.

Questi fenomeni sono alla base delle caratteristiche statiche e dinamiche osservate per i tre tipi di conglomerati.

2.2.3. Sistema a due Componenti di Legante

A metà degli anni '90, a causa dei limiti sempre più stringenti sul contenimento delle emissioni di CO₂, fu avviata una ricerca congiunta Franco-Norvegese finalizzata all'individuazione di tecniche di produzione di conglomerati bituminosi a bassa temperatura che non implicassero modifiche sostanziali all'assetto degli impianti esistenti e che garantissero le stesse prestazioni dei conglomerati a caldo (HMA).

La tecnologia messa a punto, denominata WAM-FOAM, si basa sull'uso in fase di miscelazione di bitumi hard e soft (rispettivamente a bassa e ad alta penetrazione) ed utilizza impianti standard, sia continui che discontinui, muniti di attrezzatura specifica per la schiumatura del bitume hard.

A tale riguardo giova precisare che nella fase di avvio della sperimentazione il legante a bassa penetrazione veniva introdotto sotto forma di polvere alla stessa stregua di un filler. A causa di problemi di carattere ambientale si preferì passare all'utilizzo di emulsioni bituminose per arrivare nel 1998 alla decisione di impiegare il legante hard sotto forma di schiuma.

Il processo prevede che gli aggregati vengano riscaldati a circa 130°C nell'essiccatore per essere poi mescolati con il legante a circa 110°C. Il legante, complessivamente pari al 6% in peso sulla miscela, è costituito da bitume soft (30%) immesso per primo nel miscelatore attraverso le tubazioni standard dell'impianto e da bitume hard (70%) che, prima di essere inviato al miscelatore, viene convogliato attraverso una apposita tubazione in una camera di espansione dove avviene la schiumatura.

L'azione combinata dei due bitumi garantisce una buona omogeneità della miscela finale, le cui caratteristiche prestazionali dipendono dalla bontà del processo oltre che dalla qualità dei due leganti. Consideriamo, senza entrare troppo in dettagli tecnici, le ragioni per le quali la miscelazione avviene in due fasi a differenza di quanto avviene per una normale miscela a caldo HMA, dove la temperatura di miscelazione è quella necessaria ad ottenere una viscosità sufficientemente bassa (in genere 0,2 Pa*s) corrispondente ad una temperatura tra 120 e 160°C.

Nel caso delle miscele tiepide si parte da un bitume soft che raggiunge la viscosità di 0,2 Pa*s a temperature più basse (110-120°), il che significa che la miscelazione tra bitume e aggregati risulta altrettanto efficace quanto quella ottenibile con processi a caldo.

Con l'impiego di un bitume soft la miscela finale potrebbe risultare poco resistente e soggetta alla formazione di ormaie sotto traffico.

Per migliorare le caratteristiche meccaniche del prodotto finale si rende pertanto necessaria l'aggiunta del legante hard.

E' importante che il bitume soft ricopra omogeneamente gli inerti in modo da evitare che l'acqua necessaria alla formazione della schiuma penetri all'interno degli aggregati a causa della loro microporosità, pregiudicando in tal modo l'adesione bitume aggregato e quindi la coesione della miscela finale.

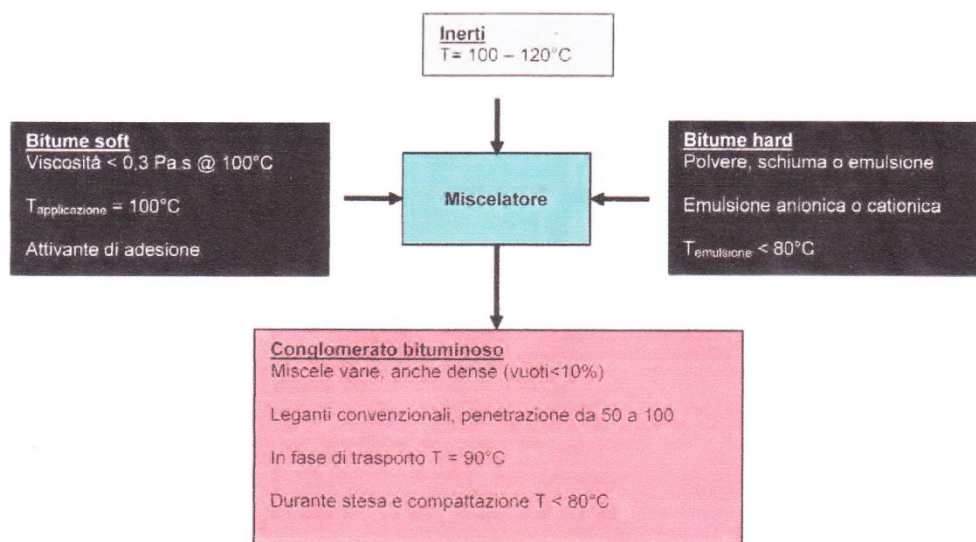


fig. 7 Schema del processo WAM FOAM

I lavori sperimentali eseguiti, oltre a confermare la validità della tecnica, hanno dimostrato anche la possibilità di impiegare impianti di produzione tradizionali. Durante le fase di laboratorio sono state condotte prove comparative tra miscele tiepide e miscele tradizionali a caldo, con particolare riferimento alle prove di resistenza alle deformazioni permanenti e di resistenza alla fatica.

Le prove sul campo sono state effettuate utilizzando per la produzione sia impianti discontinui che impianti continui; su entrambe le tipologie si sono rese necessarie modifiche marginali per inserire la linea necessaria alla schiumatura del bitume hard.

La temperatura di posa in opera delle miscele tiepide è stata impostata tra gli 80 ed i 90°C. Nell'ambito della fase sperimentale è stata anche verificata con esito positivo la possibilità di riciclare il materiale fresato in sito con le stesse modalità di processo. Nel corso di misurazioni sul campo, a parità di condizioni atmosferiche e di umidità degli inerti, si è constatata una riduzione nelle emissioni di CO₂ pari al 31,6% e contestualmente l'abbattimento delle emissioni di CO e NO_x e delle polveri. Per quanto riguarda infine l'aspetto energetico si è riscontrata in fase di confezionamento una riduzione nei consumi di carburante. Per una produzione di 125 t/h si è passati dai 6-6,5 l/T con una riduzione percentuale di circa il 30%.

2.2.4. Conglomerati Bituminosi a Bassa Energia

Il processo, noto in Francia come EBE ovvero Enrobage a Basse Energie, oppure LEA – Low Energy Asphalt secondo la terminologia anglosassone, è il risultato di un progetto di ricerca che si connota in maniera del tutto peculiare pur avendo gli stessi obiettivi di risparmio energetico ed abbattimento delle emissioni comuni a tutte le altre tecnologie. La peculiarità consiste nella messa a punto di modalità operative che si discostino il meno possibile da quelle adottate per il confezionamento e la posa in opera dei conglomerati bituminosi a caldo.

La tecnica si basa sulle proprietà fisiche del bitume: la fluidità a caldo che consente di bagnare gli inerti grossi e l'attitudine a formare "schiuma" che permette di rivestire le frazioni fini.

Utilizzando un solo bitume è possibile ottenere, con trascurabili modifiche all'impianto di produzione, una miscela dotata di buone caratteristiche meccaniche sfruttando gli effetti combinati di temperatura, acqua ed energia di miscelazione oltre che un modesto riscaldamento dell'aggregato grosso.

Nelle tradizionali tecnologie a caldo, come è noto, il calore conferito agli inerti ha un duplice scopo:

- riscaldare gli inerti ad una temperatura adeguata al loro rivestimento da parte del bitume;

- essiccare gli inerti per evitare distacchi del film di bitume dagli aggregati causa dell'acqua residua.

Considerando che il calore latente di evaporazione dell'acqua equivale a 5 volte l'energia necessaria a innalzare la temperatura della stessa massa d'acqua da 0 a 100°C si può concludere che la temperatura di 100°C rappresenta un valore di soglia oltre il quale il consumo energetico aumenta in maniera considerevole.

In queste condizioni l'acqua presente negli aggregati non viene eliminata del tutto, ma può essere utilizzata per assicurare la lavorabilità al di sotto dei 100°C, consentendo, magari con l'uso di un tensioattivo, di interagire con il bitume senza conseguenze sulle prestazioni meccaniche del prodotto finale.

Per quanto riguarda la frazione fine dell'aggregato (sabbia) occorre precisare che non è necessario che essa venga essiccata ai fini del completo rivestimento da parte del legante. Infine si può affermare che un'umidità residua pari allo 0,5% nella miscela finale è utile per una migliore compattazione e non pregiudica la prestazione complessiva.

I punti cardine del processo si riconducono alle seguenti fasi:

- riscaldamento ed essiccazione dell'aggregato grosso a circa 150°C;
- rivestimento degli aggregati con il bitume alla normale temperatura d'impiego nella quantità prevista dal progetto della miscela;
- aggiunta della sabbia umida ed a temperatura ambiente.

I tradizionali impianti, siano essi discontinui o continui, possono essere impiegati così come sono salvo modifica con idonei "KIT" che consentano l'alimentazione delle due frazioni di aggregati nella bilancia prima del miscelatore.

Sia il tamburo che l'impianto di raccolta dei fumi potranno essere di dimensioni contenute viste le minori temperature operative e l'assenza di frazioni fini.

La minore formazione di polvere richiede inoltre una minore superficie filtrante e quindi entrambi i sistemi di essiccazione e filtraggio possono essere di dimensioni più contenute in quanto trattano solo il 60% delle sostanze minerali complessive.

E' inoltre da ribadire il fatto che la tecnica consente il confezionamento e la messa in opera di conglomerati bituminosi la cui formulazione segue le stesse procedure usate per quelli tradizionali a caldo, ovvero:

- per gli studi di laboratorio si utilizzano le stesse prove che caratterizzano le miscele a caldo;
- si utilizzano le normali gradazioni di bitume stradale;

- i campi di applicazioni sono gli stessi;
- le caratteristiche meccaniche si ottengono subito dopo la stesa;
- il residuo di acqua è inferiore allo 0,5%

La tecnologia descritta è applicabile anche ad interventi di riciclaggio sostituendo, parzialmente o totalmente, la sabbia con il fresato a temperatura ambiente. Viene riportato lo schema che il processo simula all'impianto di produzione.



SCHEMA DEL PROCESSO

Il processo, illustrato schematicamente nelle figure a lato, sfrutta la caratteristica del bitume di dar luogo ad emulsioni o a schiuma in presenza di acqua.

L'acqua necessaria a queste trasformazioni è quella contenuta nella frazione fine nell'aggregato rimasta umida, a differenza dell'aggregato grosso che viene riscaldato a temperatura moderata.

1. gli aggregati vengono separati in due frazioni (pietrisco più sabbia grossa e sabbia fine più filler) che saranno immesse separatamente nel miscelatore;
2. l'aggregato grosso viene essiccato e riscaldato a temperatura inferiore a 150°C; il calore assorbito viene ceduto in parte per riscaldare l'aggregato fino ed il filler immessi nel miscelatore umidi ed a temperatura ambiente;
3. il bitume viene riscaldato alle usuali temperature di lavorazione (140-180°C). Ad esso viene aggiunto un additivo antistripping che favorisce il rivestimento degli aggregati umidi e migliora l'espansione, ovvero consente la formazione di schiuma, impedendo allo stesso tempo che l'acqua possa successivamente spogliare gli aggregati grossi;
4. il bitume riveste l'aggregato grosso in modo uniforme garantendo la formazione di un film spesso e saldamente collegato alla superficie dell'inerte;
5. eventuali correzioni di umidità della frazione fina potranno essere fatte prima del suo inserimento nel miscelatore. Un eventuale eccesso d'acqua sarà soggetto a condensa grazie agli scambi di calore con la frazione riscaldata, il che determinerà una migliore lavorabilità anche a temperature inferiori a 100°C
6. al termine della miscelazione è possibile l'aggiunta di acqua che si disperderà sotto forma di piccole gocce attorno al film di bitume, ritardandone la presa migliorandone di conseguenza la lavorabilità.

Alla temperatura di 70°C i conglomerati "a bassa energia" hanno le stesse caratteristiche dei conglomerati a caldo.

fig. 8 Fasi schematiche del processo EBE

Le applicazioni sul campo seguite agli studi di laboratorio alla fine del 2003 hanno confermato la possibilità di ottenere un livello prestazionale delle miscele tiepide del tutto analogo a quello raggiunto dai conglomerati a caldo, pur necessitando di ulteriori verifiche a lungo termine.

Il risparmio energetico e l'abbattimento delle emissioni sono risultati entrambi superiori a quelli riscontrati per le altre tecnologie tiepide.

A conferma dello sviluppo su scala industriale si segnala che un impianto di produzione di conglomerati bituminosi idoneo per questo processo è operativo nella regione di Parigi dall'aprile del 2005.

2.2.5. Additivazione con Zeoliti

Secondo questa tecnologia franco-tedesca si può ottenere la riduzione delle temperature di confezionamento dei conglomerati bituminosi dai 150 – 250°C ai 130 – 145°C additivando il bitume con zeoliti sintetiche.

Le zeoliti, silico-alluminati cristallini complessi presenti anche in natura in rocce vulcaniche, sono strutturate internamente come delle vere e proprie spugne con un contenuto di acqua pari a circa il 21% del loro peso aventi la capacità di trattenere l'acqua all'interno della loro struttura e di emettere vapore una volta riscaldate tra gli 85 ed i 180°C.

La riduzione della viscosità, che come più volte detto in precedenza consente di diminuire le temperature del processo produttivo, è in questo caso conseguenza diretta dell'emissione da parte delle zeoliti di vapore acqueo.

Il vapore che si libera determina a sua volta l'espansione del bitume e la conseguente formazione di schiuma in grado di rivestire gli inerti in fase di miscelazione.

Per il miglior risultato finale è importante che l'emissione del vapore avvenga in fasi e non in maniera istantanea.

Le zeoliti vengono aggiunte contemporaneamente al bitume in ragione dello 0,3% in peso sulla miscela, senza limitazioni particolari all'utilizzo di qualsiasi tipo di bitume e di aggregati, quali ad esempio bitumi modificati e materiale fresato, secondo formulazioni del tutto analoghe a quelle utilizzate per le miscele a caldo.

L'impianto di confezionamento del conglomerato può essere del tipo tradizionale in quanto l'impiego delle zeoliti richiede solo un dispositivo dosatore simile a quello previsto per l'aggiunta di fibre.

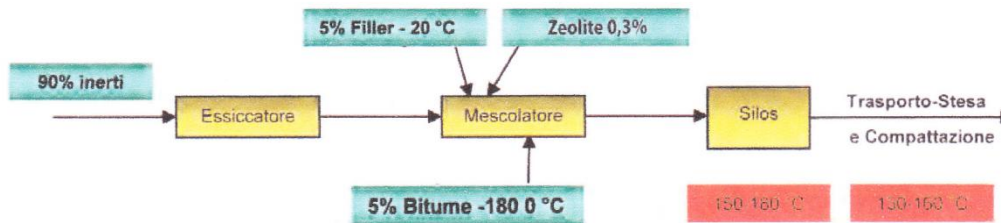


fig.9 Schema di confezionamento di WMA con sostanze inorganiche

Nel corso dei lavori sperimentali le miscele con zeoliti hanno mostrato un livello prestazionale assimilabile a quello dei conglomerati a caldo tradizionali. Sulla base di misurazioni condotte sul campo si è verificato un risparmio energetico dell'ordine del 30% in corrispondenza di una riduzione di 30 – 35°C della temperatura di produzione.

In particolare per una riduzione della temperatura di confezionamento pari a 26°C, l'abbattimento delle emissioni è risultato pari al 75%, mentre valori superiori sono stati riscontrati in fase di posa in opera dove le emissioni si sono ridotte ad 1/10 per una diminuzione di 35°C.

E' stata inoltre verificata, a parità di ogni altra condizione, la fattibilità di miscele per strati di usura confezionate con e senza zeoliti in un impianto discontinuo alle temperature di 140°C e 170°C.

Alcuni dei risultati ottenuti sono riportati nella tabella seguente.

Modalità di confezionamento	Compattazione	caratteristica dei provini			
		Spessore (cm)	Vuoti (%)	Vuoti (5cm-%)	Modulo (MPa)
Senza zeoliti-T=170°C	Immediata	6,1	6,7	6,0	11000
	Ritardata	4,9	8,5	8,4	10630
Con zeoliti-T=140°C	Immediata	4,8	5,3	6,6	12400
	Ritardata	4,5	11,8	11,3	9700
Senza zeoliti-T=140°C	Immediata	6,0	8,5	9,2	10400

tab.3 Dati comparativi di miscele con e senza zeoliti

2.3 Tecnologie Statunitensi

In aggiunta alle tecniche discusse in precedenza (diffuse soprattutto in Europa), esistono numerose tecnologie sviluppate negli Stati Uniti d'America. Di seguito viene presentato un elenco delle tecniche principali e in via di sviluppo:

- Evotherm è stato sviluppato negli Stati Uniti. Nel processo originale un'emulsione è mescolata con aggregati caldi per produrre una temperatura risultante compresa tra 85 e 115 °C. L'emulsione viene prodotta utilizzando un pacchetto di prodotti chimici destinati a migliorare il rivestimento, l'adesione e la lavorabilità. La maggior parte di acqua presente nell'emulsione viene eliminata sotto forma di vapore quando l'emulsione è mescolata con gli aggregati. stato sviluppato un nuovo processo chiamato Dispersed Technology Asphalt (DAT), in cui viene iniettata una piccola quantità di acqua nella linea di asfalto appena prima della camera di miscelazione.
- Astec industries sta sviluppando un sistema di schiumatura che può essere adattato ad alcuni tipi di impianti esistenti per le tecniche di produzione calda (HMA) per le tecniche di produzione tiepida (WMA). Il sistema utilizza un collettore con 10 ugelli per produrre la schiuma. Circa 1 lb di acqua fredda viene introdotta attraverso gli ugelli. Le temperature di produzione tipiche sono 135 ° C, con la miscela che viene immesa a partire da 115 ° C.

- PQ corporation sta producendo uno zeolite sintetico chiamato Advera.
Quest'ultimo è una gradazione più sottile con il 100 per cento passante il setaccio 0,075 millimetri.

Capitolo 3

Conclusioni

La ricerca nel settore delle pavimentazioni ha condotto negli ultimi decenni alla messa a punto di tecniche innovative impostate sul risparmio energetico e sulla tutela dell'ambiente.

Lo scenario tecnologico ha subito modifiche sostanziali, solo in parte ascrivibili al normale processo di miglioramento delle risorse (materiali e macchinari), in grado di produrre una trasformazione radicale nell'operatività dei cantieri stradali.

Il rilancio delle tecniche di riciclaggio delle pavimentazioni è certamente una risposta significativa al problema del consumo di risorse non rinnovabili e la crescente diffusione

delle tecniche in sito ne aumenta ulteriormente l'efficienza, grazie al sostanziale azzeramento del trasporto di materiali da e per il cantiere.

I vantaggi di natura ambientale raggiungono evidentemente il loro apice nel caso dei processi di riciclaggio in sito con tecniche a freddo.

In questo quadro generale si collocano le tecnologie per la produzione di conglomerati bituminosi a basse temperature, ovvero le Warm Mix Asphalt – WMA.

Rispetto alle tradizionali tecniche a caldo la riduzione di qualche decina di gradi delle temperature operative determina un sensibile risparmio energetico a cui si associa un cospicuo abbattimento delle emissioni gassose con evidenti vantaggi in termini di salvaguardia dell'ambiente e miglioramento delle condizioni di lavoro.

Emulsioni di bitume, schiuma di bitume, schiuma di emulsioni bituminose, miscele a bassa energia, additivi fluidificanti del bitume costituiscono gli elementi salienti delle tecniche di produzione dei conglomerati bituminosi per via tiepida.

Un elemento comune a tutte le tecniche WMA è l'ottimizzazione di alcune caratteristiche chimico-fisiche del bitume al fine di ottenere una miscela composta estremamente lavorabile durante la messa in opera ed in grado di assumere in tempi brevi le caratteristiche meccaniche necessarie a sopportare i carichi indotti dal traffico stradale. Pur essendo le miscele tiepide presenti da poco tempo sulla scena dei lavori stradali si può affermare che esse rappresentano per i gestori di infrastrutture un valido complemento alla gamma degli strumenti tecnologici disponibili per soddisfare le molteplici esigenze del settore.

In attesa di conoscere l'esito di ulteriori sperimentazioni in corso è tuttavia possibile esprimere un primo giudizio sulle tecnologie fin qui esaminate limitatamente ai risultati degli studi di laboratorio ed all'impatto sull'organizzazione dei mezzi di cantiere.

In generale si può osservare che con i conglomerati a bassa energia (processo EBE/LTA) si ottengono maggiori riduzioni delle temperature di processo e nel contempo si rendono necessarie minori modifiche sia alla configurazione dell'impianto di confezionamento sia alle sue tradizionali modalità operative.

Va comunque sottolineato che le altre opzioni rappresentano valide soluzioni tecnologiche e senza dubbio meritevoli di ulteriori approfondimenti volti ad aumentarne la diffusione.

L'efficienza delle tecniche tiepide nelle attività di manutenzione sarà definitivamente sancita quando ne sarà possibile il diffuso utilizzo nei treni di riciclaggio in sito.

In questo caso ai risparmi energetici già realizzati si aggiungeranno anche quelli relativi all'impiego totale del fresato ed alla riduzione dei costi del trasporto dei materiali, diversamente da quanto avviene nei processi di riciclaggio in impianto fisso.

Nella tabella successiva è riportata una sintesi degli principali aspetti delle tecnologie esaminate in termini di:

- natura e dosaggio degli additivi impiegati;
- temperature di processo durante miscelazione, stesa e compattazione;
- dispositivi di miscelazione e problemi produttivi;
- applicazioni e caratteristiche prestazionali della pavimentazione.

Dai dati in tabella si evince che alcuni punti sono entro certi limiti comuni a tutte le tecniche WMA:

- ridotti consumi di energia;
- ridotta formazione di CO₂;
- meno fumi e aerosol in fase di messa in opera;
- meno emissioni all'impianto di confezionamento ;
- minor invecchiamento del legante;
- migliori caratteristiche prestazionali della miscela.

A completamento di quanto sopra le seguenti considerazioni integrano quanto desumibile dalla tabella:

- La maggior parte dei processi esaminati necessita di additivi speciali e/o di modifiche delle attrezzature esistenti. Nel valutarne la fattibilità è pertanto necessaria una particolare attenzione in quanto i costi di investimento potrebbero essere controbilanciati dai costi di additivazione e viceversa;
- Le prestazioni in termini di risparmi ambientali ed energetici non sono necessariamente correlate alle prestazioni della pavimentazione o all'ampiezza del loro spettro applicativo;
- È importante notare che le tecniche tiepide fin qui esaminate conducono a miscele con prestazioni vicine o perfino migliori delle miscele a caldo convenzionali.

Processo	Additivi		Risparmi	Caratteristiche aggiuntive	Problemi produttivi	Temperatura stoccaggio bitume	Temperatura di miscelazione	Temperatura di posatura	Impianto di confezionamento	Applicazioni	Caratteristiche medie prestazionali
	Natura	Dose									
Additivazione con fluidificanti del bitume	Paraffine FT	2-4% su bitume	Energetici, riduzione fumi, Tempi ridotti per miscelazione e compattazione	Irrigidimento del bitume Stesa più veloce	Attrezzatura di immissione additivo e unità di mescolamento	30°C inferiore alla temperatura usuale di stoccaggio	130-150°C	120-130°C	Continui e Discontinui	Basi e tappeti inclusi con glomerati chiusi, SMA, mastici	Maggiore resistenza a ormalamento rispetto alle HMA
Schiuma di emulsione	Agente schiumante e emulsionante	N/A	Energetici, riduzione fumi	Bassa ossidazione bitume. Richiede stoccaggio tiepido del bitume	Attrezzatura sottopressione di 2,5 bar	80-90 °C surriscaldato alla miscela a 110-125 °C	Aggregato 110-120 °C	75-90 °C in funzione del legante	Treni di riciclaggio a caldo. Impianti con miscelazione con emulsioni a freddo	Ampia gamma di miscelazione particolarmente con RAP	Resistenza a ormalamento, tra miscelazione chiuse e SMA. Compattazione simile a HMA
Bitume schiumato e aggregati riscaldati	Dope d'adesione o composto reattivo igroscopico	N/A	Energetici, riduzione fumi	Miscela lavorabili quanto quelle tradizionali HMA	Barra di immissione schiuma di bitume calibrata per ambiente caldo e polveroso	Temperatura di stoccaggio bitume abituale	Aggregato 90 °C	60-70 °C	Continui e discontinui con adattamenti ulteriori a barra schiumato per discontinui	Basi chiuse e tappeti con ampia gamma di miscelazione particolarmente con RAP	Stessa delle miscelate a caldo
Sistema a due componenti di legante	Dope d'adesione nel bitume soft. Agente schiumante nell'hard	N/A	30% di carburante & 30% CO ₂ e 50-60% riduzione di polvere	Miscelate con più lunga stabilità allo stoccaggio. Impianto riscaldamento e raccolta polveri più semplici	Modifiche all'impianto per schiumatura. Possibile necessità alimentazione asfalto	Temperatura di stoccaggio legante abituale	100-120 °C	70-100 °C	Impianti continui e discontinui	Adatto per basi e tappeti	Stesse prestazioni HMA (ormale, regolarità e tessitura superficiale) per miscelate dense
Conglomerati bituminosi a bassa energia	Dope d'adesione	0,3% mix	50% energia & 50% CO ₂ e IPA	Abbattimento polveri e pulizia attrezzatura	Unità di ricircolo sul tamburo	Normale (140-180°C)	60-90°C	60-70°C	Continui e Discontinui	Ampia gamma di miscelazione con RAP e modificato	Stessa delle Miscelate a caldo
Additivazione con Zeoliti	Zeoliti nella miscela	0,3% mix	30% carburante, 75% fumi, riduzione particolato	Nessuna influenza sulla prestazione dell'impianto. Meno ossidazione bitume	Cisterna di stoccaggio, nastro alimentatore dispositivi per zeoliti	Solita (140-180 °C)	130-145 °C	100 °C	Impianti continui e discontinui	Ampia gamma di miscelazione incluso modificato, asfalti con RAP e mastici	Stessa delle Miscelate a caldo

Tab. 4: Quadro sinottico relativo alle tecniche di produzione di miscelate bituminose con processi a bassa temperatura

Bibliografia

- Wirtgen group, Manuale riciclaggio a freddo;
- Barm, Basic Asphalt Rycicling manual;
- REAL – Road Emulsion Association Limited (1998). The Retread Process. REAL Technical Data Sheet No. 10.
- Csanyi L.H. (1957) Foamed Asphalt in Bituminous Paving Mixtures. In Highway Research Records No. 160, National Research Council, Washington, DC, pp. 108-122.
- Chiu C.T, Huang M.Y. (2003) A study on properties of foamed asphalt treated mixes, Proc. 82th TRB Meeting, Washington D.C.
- Radoani E. (2003) “Il treno di riciclaggio”, LE STRADE 7-8/2003.
- Fargas A. (2003) “Asportare a freddo”, LE STRADE 9/2003.
- M. Colombo (2004) “Fredde e possenti”, , LE STRADE 6/2004.
- D. Lesuer (2004) “Le projet score: superior cold recycling”, Revue Générale des Routes et des Aérodrômes N°827 4/2004.
- Foschi R., Bonola M., Sandulli D. (2003) “Il riciclaggio in situ di pavimentazioni con emulsioni di bitume modificato – l’esperienza di Pavimental sulla rete Autostrade”, relazione presentata per il premio SITEB - VALLI ZABBAN. Giornata Mondiale dei Produttori di Emulsioni Bituminose Stradali - Lione 2002 - pubblicata su Rassegna del Bitume, n°43-2003.
- Bonola M., Foschi R., Sandulli D. (2003) “Riciclaggio in sito di pavimentazioni con emulsioni di bitume modificato”, LE STRADE 1-2/2003.
- Bonola M., Foschi R. (2003) “Schema manutentorio integrato di manutenzione delle pavimentazioni stradali”, LE STRADE 4/2003.
- Valeri L., Triquigneaux J.P. (2004) “Biochape - Graveémulsion de recyclage innovante”, , Revue Générale des routes et des Aérodrômes n°833 11/2004.
- Bonola M. (2005) “Il riciclaggio come strumento di gestione della manutenzione”, LE STRADE 5/2005.

- AIPCR, (2001). Recyclage des chaussées souples existantes, Recycling of Existing Flexible Pavements. , Comité technique AIPCR de Chaussées routières (C7/8), pp.75.
- SITEB. (2002). Tecniche di Riciclaggio delle pavimentazioni stradali, Manuale per l'uso corretto del conglomerato bituminoso fresato, Commissione SITEB Riciclaggio, febbraio 2002.
- Battiato G., Peroni G.. (1983). La rigenerazione dei conglomerati bituminosi: nuove metodologie di formulazione, Autostrade anno XXV n° 9, Settembre 1983. Pagg. 49-61.
- Camomilla G., Peroni G. (1981). Nuovi metodi per la valutazione delle tecniche di riciclaggio dei conglomerati bituminosi, Autostrade anno XXIII n° 6, Giugno 1981. Pagg. 11-19.
- Camomilla G., Malgarini M. (1983). Rigenerazione dei conglomerati bituminosi, Autostrade anno XXV n° 9, Settembre 1983. Pagg. 62-64.
- MIT (2001). Studio a carattere pre-normativo delle Norme Tecniche di Tipo Prestazionale per Capitolati Speciali d'Appalto. MIT Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Ispettorato per la Circolazione e la Sicurezza Stradale. Roma, Italia.
- ANAS (2001). Capitolato Speciale d'Appalto - Norme Tecniche ANAS Ente Nazionale per le Strade - Direzione Centrale Progettazione e Programmazione, Roma, Italia.
- Autostrade per l'Italia s.p.a. (2004). Manutenzione e Costruzione delle pavimentazioni: Norme tecniche d'appalto prestazionali. – Manutenzione e Standard 2004, Roma, pp. 163
- DM 5 febbraio 1998 Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22. Allegato 3: Test di cessione. Supplemento Ordinario n. 72 alla Gazzetta Ufficiale italiana n. 88 del 16 aprile 1998, Roma, Italia.
- ASTM (1997) D5404 – 97 Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator. American Society for Testing and Materials. Volume 04.03, West Conshohocken, PA.

- NCHRP Report 452, McDaniel R., Anderson R. Michael (2001). Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual. Pagg. 49. Transportation Research Board – National Research Council. Washington DC. Pag. 1- 49.
- Moneron P., (1997), Retraitement a chaud des meteriaux bitumineux en centrale, Note d'information n° 98, Observatoire des techniques de Chaussées, Editeur SETRA, LCPC centre de Nantes. France.
- Sauterey R., Chappat M., (1980). Le mots en "R" (Rabotage, regeneration, Recyclage), Revue General des Route et des Aerodromes n° 568 october 1980, France, ag. 10-16.
- Commissione CEE WG1/tg3 UNI-EN 13108 Bituminous mixtures – material specification parti da 1 a 8" UNI 2006.
- "Bituminous mixtures – material specification – part 1 - Asphalt Concrete"
- "Bituminous mixtures – material specification – part 8 - Reclaimed Asphalt"
- UNI EN 13108: 2006 - Miscele bituminose - Specifichedel materiale – Parti 1-8
- R.Ruhl, The german bitumen forum - Co-Operation in Partnership, 3rd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Vienna 2004.
- R.Van Wilk, The environment management act, energy efficiency in dutch asphalt industry, 3rd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Vienna 2004.
- C. Giavanini, Le ricerche per ridurre la temperatura del conglomerato, asfalto e innovazione - ASPHALTICA 2003, pag 103-110, - Ed. SITEB.
- J.P. Planche, S.Mariotti, A.Stawiarsky, New trends in working temperature reduction of asphalt pavement, Technical paper.
- A.Romier, M. Auderon, J.David, Y.Martineau, Low-Energy asphalt (LEA) with the performance of hot mix asphalt (HMA), European Roads Review, Special Issue, RGRA 2-2004.
- L.Drushner, low temperature asphalt - Experience in rolled asphalt, 3rd Euroasphalt % Eurobitume Congress, Vienna 2004.
- Australian Asphalt Pavement Association: Warm Mix Asphalt - a state of the art review, Advisory note 17
- W.Barthel, J.P. Marchand, M.Von Devivere, Warm Asphalt Mixes by adding a synthetic.

- Koenders et al, Innovative process in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures, 2nd Eurasphalt % Eurobitume Congress, Barcelona 2000.
- Van Der Ven, Mangus et al, Experience with half warm foamed bitumen treatment process in the netherlands, extract from CAPSA 2004 papers.
- J.H.Jellie, A. Sewerll, I.Walsh, P.Phillips, a.R.Woosside, Assessing performance of cold mix foamed emulsion asphalt mixes, 3rd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Vienna 2004.
- K.J.Jenkins, A.A.A.Molenaar, J.L.A.De Grrot, foamed asphalt produced using warmed aggregates, 2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress Barcelona 2000.
- K.J.Jenkins, A.A.A.Molenaar, J.L.A.De Grrot, foamed asphalt produced using warmed aggregates, journal of association of asphalt paving technologists Vol 71, 2002.
- AASHTO STANDING COMMITTEE ON HIGHWAYS, Warm mix asphalt technology, Technical committee, september 18, 2005.