



**L'INFLUENZA DEL TIPO DI EMULSIONE
SULLE CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE
E MECCANICHE DI CONGLOMERATI
BITUMINOSI RICICLATI A FREDDO**

Ezio Santagata

Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili
Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 Torino
Tel. 011.5645633 - Fax 011.5645614
e-mail: santagata@polito.it

Giuseppe Chiappinelli

Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili
Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 Torino
Tel. 011.5645636 - Fax 011.5645614
e-mail: chiappinelli@polito.it

L'INFLUENZA DEL TIPO DI EMULSIONE SULLE CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE E MECCANICHE DI CONGLOMERATI BITUMINOSI RICICLATI A FREDDO

EZIO SANTAGATA - DITIC - Politecnico di Torino

GIUSEPPE CHIAPPINELLI - DITIC - Politecnico di Torino

SOMMARIO

Per effetto dei notevoli vantaggi ambientali ed energetici associati al loro impiego, le tecniche di riciclaggio e rigenerazione a freddo dei conglomerati bituminosi sono allo stato attuale oggetto di un crescente interesse da parte delle amministrazioni ed imprese del settore stradale. Allo stesso tempo, i ricercatori del settore si stanno concentrando sullo studio dei materiali da impiegare per potere ottenere, nell'ambito di queste tecniche, prestazioni soddisfacenti.

Nella presente memoria gli Autori forniscono il loro contributo a questo tema di grande attualità, facendo riferimento ai risultati sperimentali ottenuti in laboratorio su miscele bituminose riciclate a freddo con vari tipi di emulsione. In particolare, al variare del tipo di emulsione, vengono prese in considerazione sia le caratteristiche di lavorabilità ed addensamento sia quelle meccaniche (tenso-deformative e di resistenza). Vengono inoltre presi in esame gli effetti determinati dall'impiego di due diverse tecniche di compattazione e da variazioni del tempo di attesa prima del costipamento.

ABSTRACT

As a result of the relevant environmental and energy-saving advantages associated to their use, cold-recycling techniques of bituminous mixtures are currently of increasing interest both for administrators and contractors which are active in the area of road construction and maintenance. Researchers are therefore focusing on the analysis of the materials to use in order to obtain a satisfying performance with these techniques.

In this paper the Authors give their contribution to this issue showing the laboratory results obtained in an investigation carried out on bituminous mixtures recycled with various types of emulsions. As a function of the variation of emulsion type, the recycled mixtures are analysed with respect to their workability, compaction and mechanical properties. Moreover, the effects deriving from the use of two different compaction techniques and from the variation of the waiting time before compaction are also taken into account.

1. INTRODUZIONE

Per effetto dei notevoli vantaggi ambientali ed energetici associati al loro impiego, le tecniche di riciclaggio e rigenerazione a freddo dei conglomerati bituminosi sono allo stato attuale oggetto di un crescente interesse da parte delle amministrazioni ed imprese del settore stradale. Allo stesso tempo, i ricercatori del settore si stanno concentrando sullo studio dei materiali da impiegare per potere ottenere, nell'ambito di queste tecniche, prestazioni soddisfacenti.

Nel caso specifico delle emulsioni bituminose, sono nati prodotti per le applicazioni di riciclaggio che si differenziano tra loro per formulazione e per tecnica di produzione. Essi possono influenzare in maniera determinante l'esito degli interventi di riciclaggio e richiedono pertanto studi comparativi che ne evidenzino l'efficacia o che ne mettano in luce le deficienze.

Gli Autori, a fronte di queste osservazioni, hanno sviluppato una ricerca sperimentale con la quale si sono valutati in laboratorio gli effetti che differenti emulsioni hanno su quelle proprietà dei conglomerati bituminosi riciclati a freddo che risultano direttamente o indirettamente collegate alle prestazioni in opera. In particolare, si sono prodotte e studiate miscele bituminose riciclate con diverse tipologie di emulsioni valutandone quindi le caratteristiche di addensamento e lavorabilità nonché le caratteristiche tenso-deformative e di resistenza.

Le attività sperimentali sono state sviluppate all'interno di un più ampio progetto di ricerca che vede il Politecnico di Torino, ed il Centro Interuniversitario Sperimentale di Ricerca Stradale (CIRS) di cui esso fa parte, impegnati nella diffusione della cultura del riciclaggio dei materiali nel settore delle costruzioni stradali [PRIN, 2001]. Le indagini descritte in questa memoria sono state compiute all'interno del Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino.

2. MATERIALI

La scelta dei materiali è stata effettuata in modo da realizzare delle miscele bituminose riciclate a freddo il più possibile simili a quelle realmente poste in opera. In particolare, si è fatto riferimento alle caratteristiche medie di composizione (granulometria degli aggregati estratti e percentuale complessiva di bitume) delle miscele prodotte dall'impianto di produzione fisso di riciclaggio utilizzato a servizio dei lavori di risanamento delle pavimentazioni dell'autostrada A4 Torino - Milano [Santagata & Chiappinelli, 2001, Santagata et al., 2001].

2.1. Fresato

Il fresato impiegato nel corso della ricerca deriva dall'asportazione dell'intero pacchetto di conglomerato bituminoso di 25 cm presente sull'autostrada Torino - Milano. Per garantire una soddisfacente uniformità delle miscele di laboratorio, per le quali si voleva evidenziare il ruolo svolto dalle emulsioni piuttosto che dalla eventuale variabilità del fresato, quest'ultimo è stato preventivamente essiccato (almeno 6 ore a 40°C) e quindi suddiviso in classi dimensionali. Su ciascuna di queste classi, individuate dai setacci aventi aperture delle maglie pari a 25, 10 e 5 mm, sono state quindi effettuate le prove per la determinazione della percentuale di bitume e della

granulometria degli aggregati estratti. Le miscele di rigenerato a freddo sono state quindi proporzionate, partendo da questi componenti, in modo da ottenere delle miscele di composizione pressoché costante e simili a quelle messe in opera sull'autostrada.

Durante la ricerca sono pervenute in Laboratorio quattro forniture di fresato. Di conseguenza, per ciascuna di esse si è provveduto a ripetere le analisi compositive i cui risultati medi sono riportati in Tabella 1.

D (mm)	Passante (%) sabbione 0/5			Passante (%) pietrischetto 5/10			Passante (%) pietrisco 10/15			
	n°1	n°2	n°3	n°1	n°2	n°3	n°1	n°2	n°3	n°4
25	-	-	-	-	-	-	100	100	100	100
20	-	-	-	-	-	-	95,4	97,6	85,7	90,3
15	-	-	-	-	-	-	83,1	82,3	63,2	67,3
10	-	-	-	100	100	100	33,4	34,5	26,8	28,8
5	100	100	100	34,1	33,6	28,0	20,3	21,8	17,0	19,4
2	80,5	76,3	80,0	22,3	22,8	17,8	16,5	17,6	13,8	15,9
0,4	27,5	31,2	37,0	13,9	14,3	11,4	9,7	10,1	7,9	9,4
0,18	10,5	16,8	17,4	7,7	9,4	7,3	6,0	6,4	5,2	6,0
0,074	4,1	8,0	4,9	2,3	5,1	3,4	3,4	3,7	3,3	2,5
%b	6,10	6,37	6,04	3,82	3,74	3,52	3,09	3,03	2,45	2,78
%B	5,75	5,99	5,70	3,68	3,61	3,40	3,00	2,94	2,39	2,70

Nota: %b è la percentuale di bitume riferita agli aggregati, %B è la percentuale di bitume riferita al conglomerato riciclato.

Tabella 1 – Curve granulometriche e percentuali di bitume delle varie forniture di fresato

2.2. Cemento

Ad integrazione della parte fine della miscela riciclata si è impiegato un cemento tipo Portland R32,5 avente un passante del 99,8% al vaglio da 0,18 mm e del 94,2% al vaglio da 0,074 mm.

Il ruolo svolto dal cemento nelle miscele riciclate a freddo non è stato fino ad oggi definito in maniera univoca. È comunque generalmente accettata l'ipotesi che tale legante idraulico influenzi in maniera diretta (mediante integrazione della parte fine ed idratazione) ed indiretta (favorendo la rottura dell'emulsione) la variazione che le caratteristiche meccaniche delle miscele evidenziano nel tempo.

2.3. Emulsioni

Sono state impiegate quattro emulsioni non modificate, genericamente individuate dai fornitori come "emulsioni di riciclaggio", derivanti da tecniche di produzione diverse e dall'utilizzo di bitumi di partenza ed emulsivi differenti fra loro.

Tali emulsioni, indicate nel seguito con le sigle A, B, C e D, sono state classificate in maniera estremamente semplice mediante la determinazione del contenuto d'acqua e di residuo bituminoso, nonché di alcune caratteristiche empiriche valutate sul residuo bituminoso: la viscosità Engler a 20°C, il punto di rammollimento (metodo palla e anello) e la penetrazione a 25°C. I valori medi delle grandezze misurate in tale fase della sperimentazione sono riportati nella Tabella 2.

Per la preparazione delle miscele riciclate a freddo le varie emulsioni sono state impiegate in percentuali, riferite al fresato secco, differenti ma tali da giungere ad un valore costante del contenuto di bitume complessivo nelle miscele riciclate. In tal senso,

quale valore obiettivo si è assunto il valore medio della percentuale di bitume desunto dalle prove di estrazione eseguite, nel corso dell'anno 2000, sulle miscele prodotte dall'impianto fisso di riciclaggio a freddo su menzionato .

	A	B	C	D
Viscosità Engler a 20°C (°E)	9	7	5	5
Residuo bituminoso (%)	60,1	57,5	63,0	60,5
Penetrazione a 25°C (dmm)	42	101	230	238
Punto di rammollimento (°C)	48	42	39	36

Tabella 2 – Risultati delle prove effettuate sulle emulsioni

2.4. Acqua

Per la preparazione delle miscele riciclate a freddo è necessario un certo quantitativo di acqua, detta di aggiunta. A tale scopo è stata impiegata acqua potabile non contenente sostanze nocive come limo, solfati, cloruri ed acidi organici.

Il dosaggio dell'acqua di aggiunta è fondamentale, in quanto concorre alla lavorabilità del materiale e contribuisce alla dispersione dell'emulsione nella massa del fresato. In questa ricerca si è impiegato un valore costante della percentuale dell'acqua di aggiunta pari al 2% sul peso del fresato essiccato.

2.5. Definizione della miscela di progetto

Come sopra menzionato, nel corso della ricerca, pur facendo riferimento ad una definita granulometria e ad un'unica percentuale di bitume finale, non si è utilizzata un'unica formula d'impasto per il proporzionamento delle miscele riciclate a freddo. Ciò deriva dalla variabilità di composizione delle diverse forniture di fresato (Tabella 1), della quale si è dovuto tenere conto all'atto della miscelazione dei componenti.

I dati relativi alla distribuzione granulometrica obiettivo sono riportati nella Tabella 3. Essi individuano una miscela avente caratteristiche assai vicine a quelle di un binder chiuso, e derivano dalle estrazioni ed analisi eseguite sulle miscele riciclate messe in opera sull'autostrada Torino - Milano nel 2000 [Santagata & Chiappinelli, 2001]. Per tali miscele il valore medio del contenuto complessivo di bitume è risultato pari al 5,75%.

Le sei formule di impasto utilizzate in laboratorio nel corso delle indagini sperimentali sono riportate nella Tabella 4, nella quale non sono indicate le percentuali di cemento ed acqua, costanti per tutte le miscele e pari rispettivamente al 2,5% ed al 2,0%.

D (mm)	Passante (%)
25	100,0
20	98,9
15	92,2
10	71,0
5	49,8
2	38,4
0.4	19,6
0.18	12,6
0.074	7,6

Tabella 3 – Curva granulometrica di progetto

Impasti	Percentuale sabbione 0/5			Percentuale pietrischetto 5/10			Percentuale pietrisco 10/25				Percentuale emulsione
	n°1	n°2	n°3	n°1	n°2	n°3	n°1	n°2	n°3	n°4	
1	31,40	-	-	24,35	-	-	44,25	-	-	-	2,64
2	31,37	-	-	-	24,38	-	44,25	-	-	-	2,67
3	-	31,44	-	-	34,73	-	33,83	-	-	-	2,42
4	-	31,13	-	-	23,91	-	-	44,96	-	-	2,60
5	-	32,43	-	-	32,14	-	-	-	35,43	-	2,78
6	-	-	32,76	-	-	29,38	-	-	-	37,85	2,87

Nota: Tutte le percentuali indicate sono riferite al peso secco del fresato.

Tabella 4 – Formule d'impasto delle miscele bituminose riciclate a freddo

3. ATTREZZATURE E METODOLOGIE DI PROVA

3.1. Miscelazione

In laboratorio la miscelazione dei componenti è stata effettuata manualmente provvedendo dapprima alla miscelazione delle classi costituenti il fresato e poi all'aggiunta progressiva di cemento, acqua ed emulsione. Il costipamento dei campioni prodotti con le quattro tipologie di emulsioni è quindi avvenuto a temperatura ambiente dopo 30 minuti di attesa successivi alla miscelazione. Per le sole emulsioni A e B si sono preparati provini di miscele riciclate con tempi di attesa prima della compattazione pari a 60 minuti.

3.2. Compattazione

Per la compattazione delle miscele si sono utilizzate due diverse attrezzature: una pressa ad azione statica appositamente progettata e realizzata per queste indagini, e la pressa a taglio giratorio, per la quale sono state realizzate delle apposite fustelle a tenuta con piastre di base forate.

Durante il costipamento con la pressa statica i campioni sono stati soggetti ad una pressione verticale di compattazione pari a 6050 kPa, mantenuta costante per 5 minuti per mezzo di un martinetto idraulico. Successivamente, una volta rilasciato il carico, i campioni sono stati immediatamente estrusi e posti a maturare a temperatura ambiente.

Per la compattazione alla pressa giratoria sono stati utilizzati parametri di impostazione simili a quelli tipici dei conglomerati bituminosi di tipo tradizionale. In particolare si sono imposti un angolo di rotazione di 1,25°, una velocità di rotazione di 30 rpm, una pressione verticale pari a 600 kPa ed un numero complessivo di giri pari a 150. Al termine della compattazione, come nel caso di compattazione statica, i campioni sono stati immediatamente estrusi dalle fustelle.

Il quantitativo impiegato per il confezionamento di ciascun campione è stato, per entrambi le metodologie di compattazione, pari a 1150 grammi. Le fustelle impiegate hanno un diametro interno pari a 101,6 mm nel caso di costipamento statico e pari a 100 mm nel caso di costipamento giratorio.

È importante sottolineare che durante il confezionamento dei provini si è consentito, per entrambe le metodologie utilizzate, il drenaggio della fase liquida unicamente attraverso la faccia inferiore dei campioni. Ciò è stato reso possibile da una serie di fori

esistenti nelle piastre di supporto ed ha altresì consentito la raccolta, tramite opportuni bicchieri metallici posizionati al di sotto di esse, della fase liquida espulsa durante l'addensamento.

3.3. Condizionamento

Durante l'intera sperimentazione i campioni di prova sono stati conservati a temperatura ambiente. Prima di essere sottoposti alle prove per la determinazione del modulo elastico e della resistenza a trazione indiretta, i provini sono stati introdotti all'interno di una cella climatica, impostata alla temperatura di prova desiderata (20°C), per un periodo di almeno 12 ore.

3.4. Valutazione delle caratteristiche volumetriche

Per la determinazione della massa volumica dei campioni delle miscele rigenerate a freddo ci si è avvalsi delle procedure previste dalle normative CNR 40-73 o ASTM D1188-88. Esse prevedono il rivestimento della loro superficie mediante paraffina, che provocherebbe tuttavia alterazioni tali da pregiudicare la possibilità di eseguire in tempi successivi prove di tipo meccanico. Alla luce di tale considerazione si sono predisposte delle serie di campioni per la sola valutazione della volumetria e lavorabilità del conglomerato riciclato compattato utilizzando entrambi le tecniche di compattazione descritte in precedenza (statica e giratoria). Le misure sono state inoltre effettuate, su serie di campioni distinti, sia allo stato umido (subito dopo l'estrusione dei campioni dalle fustelle) sia allo stato secco (dopo stagionatura in cella a 40°C per 3 giorni).

Sulle miscele riciclate e sugli aggregati da esse estratti (comprensivi del cemento) si sono determinate rispettivamente la *Theoretical Maximum Density (TMD)* secondo la norma ASTM D2041-78 e la Massa Volumica Apparente (*MVA*) secondo la CNR 63-78. Successivamente si sono potuti così calcolare, con le metodologie indicate nelle norme ASTM e CNR, i vari parametri volumetrici tra cui la percentuale dei vuoti (%v), il contenuto dei vuoti nella miscela secca di aggregati (*VMA*) e la percentuale dei vuoti riempiti da bitume (*VFA*).

3.5. Valutazione delle caratteristiche meccaniche

Per la valutazione delle caratteristiche tenso-deformative delle miscele riciclate, ed in particolare del loro modulo elastico nella configurazione di carico di trazione indiretta, è stata utilizzata una apparecchiatura universale a controllo elettro-pneumatico, denominata Nottingham Asphalt Tester (NAT), che rispetta le prescrizioni della norma BSI DD213 [Santagata, 1996, Santagata & Bassani, 1999]. Il modulo elastico E è stato pertanto determinato imponendo una serie di carichi impulsivi verticali di valore pari a P e misurando in corrispondenza di essi le elongazioni Δ subite dal piano diametrale orizzontale del campione cilindrico di prova avente spessore pari ad s . Facendo riferimento ad un valore del rapporto di Poisson ν assunto, in mancanza di determinazioni dirette, pari a 0,35, per la valutazione di E si è quindi utilizzata la seguente relazione:

$$E = \frac{P \cdot (0,273 + \nu)}{\Delta \cdot s}$$

Le prove di rottura per trazione indiretta sono state effettuate alla temperatura di 20°C con una pressa ad azione statica avente caratteristiche compatibili con quanto

indicato nella norma CNR 134/91. Si sono quindi rilevate la resistenza a trazione indiretta e le deformazioni a rottura che possono essere calcolate, in funzione del massimo carico misurato P , del diametro del campione D , del suo spessore s , e delle variazioni finali di lunghezza del diametro verticale (Δ_v) ed orizzontale (Δ_h), mediante le seguenti espressioni:

$$R_t = \frac{2P}{\pi D s} \quad \varepsilon_v = \frac{\Delta_v}{D} \quad \varepsilon_h = \frac{\Delta_h}{D}$$

Le prove meccaniche sui campioni preparati con la pressa statica e con la pressa giratoria sono state previste ed eseguite in corrispondenza di prefissati tempi di maturazione. Questi, espressi in giorni, sono riportati, per ciascuna tipologia di prova, nella Tabella 5. In corrispondenza di ciascun tempo di maturazione sono state effettuate misure su terne di campioni nominalmente identici e si è quindi fatto riferimento al valore medio delle grandezze rilevate.

	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	t ₉	t ₁₀
Modulo elastico	-	3	7	14	21	28	35	45	60	120
Trazione indiretta	-	3	7	14	-	-	-	-	-	120

Tabella 5 –Programma delle prove meccaniche

3.6. Controlli di composizione

Per la verifica dell'affidabilità della procedura di combinazione delle classi di fresato e della costanza delle miscele riciclate da esse risultanti, si sono effettuate delle estrazioni di legante sulle miscele riciclate essiccate e delle analisi granulometriche sul materiale estratto. Questi ulteriori controlli sono stati eseguiti su provini selezionati in maniera casuale tra quelli già sottoposti a prove di rottura per trazione indiretta.

Per l'esecuzione delle estrazioni di legante dalle miscele secche di rigenerato o di fresato è stata utilizzata una procedura a freddo con doppia centrifuga così come previsto dalla norma CNR 38/73.

4. RISULTATI SPERIMENTALI E ANALISI DEI DATI

4.1. Composizione delle miscele

Dalle estrazioni effettuate sulle miscele riciclate a freddo per il controllo della costanza della composizione granulometrica dei campioni prodotti, si è ottenuto, raggruppando le varie curve granulometriche, il fuso riportato in Figura 1. In ragione della ridotta ampiezza del fuso, che contiene la curva di progetto e presenta rispetto ad essa un valore medio dello scostamento assoluto pari al 3,5%, si può concludere che il metodo di preparazione delle miscele riciclate risulta affidabile e che i provini analizzati possono essere considerati sostanzialmente identici.

Anche il contenuto di bitume complessivo, riferito alla miscela di aggregati comprensivi del cemento, ha evidenziato scostamenti minimi rispetto al valore obiettivo, pari al 5,75%. I risultati ottenuti nelle estrazioni eseguite sulle miscele riciclate (Tabella 6) hanno infatti sortito un valore medio pari al 5,94%, con un valore medio dello scostamento assoluto pari allo 0,23%.

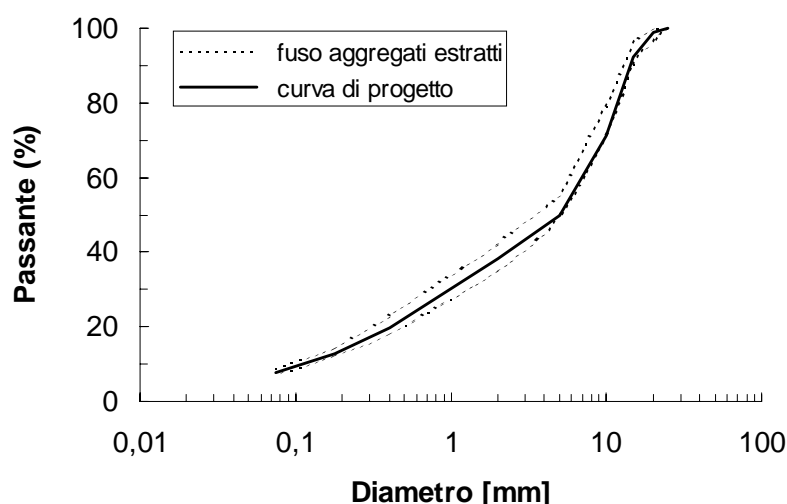


Figura 1 – Fuso granulometrico degli aggregati estratti (comprensivi del cemento)

Estrazioni	Percentuale di bitume sulla miscela di aggregati
1	5,63
2	5,75
3	6,09
4	5,97
5	6,11
6	6,08

Tabella 6 – Percentuale di bitume finale delle miscele riciclate

4.2. Modulo elastico

I risultati delle prove di trazione indiretta ripetuta sono stati utilizzati per valutare l'evoluzione che le caratteristiche tenso-deformative delle miscele subiscono nel tempo. A tale scopo, dopo avere operato un primo trattamento dei dati per eliminare i risultati statisticamente non significativi in quanto non compresi in un intervallo di confidenza dell'80%, si è ipotizzata l'esistenza di una relazione lineare tra il logaritmo dei giorni di maturazione ed il modulo elastico [Santagata, 2000]. Questo tipo di modellazione consente di prescindere dalle variazioni del modulo elastico che dipendono da fattori quali la disomogeneità interna dei campioni, la loro non perfetta termostatazione e l'eventuale presenza di errori sperimentali di tipo casuale. Viene così individuata una curva di evoluzione del modulo elastico che può essere considerata a pieno titolo rappresentativa delle caratteristiche medie intrinseche del materiale.

I parametri che possono essere utilizzati per una sintetica descrizione dell'evoluzione del modulo elastico nel tempo sono i seguenti:

- $E_{iniziale}$, il valore dell'ordinata all'origine della retta di regressione, che rappresenta il valore del modulo elastico stimato a 1 giorno di maturazione, ossia la rigidità a brevissimo termine della miscela;
- $dE/d(\log t)$, il valore della pendenza della retta di regressione, che rappresenta la velocità di maturazione della miscela espressa in MPa/log(giorno);
- $E_{120\text{ gg}}$, il valore del modulo elastico stimato a 120 giorni, che rappresenta il comportamento strutturale a lungo termine del materiale riciclato.

Tali parametri, oltre a sintetizzare la maturazione di una singola miscela, consentono di confrontare tra loro miscele rigenerate a freddo differenti in quanto a composizione o a procedura di compattazione utilizzata. Ciò viene mostrato nella Tabella 7, ove i risultati delle regressioni su descritte sono stati distinti in base alla tipologia di emulsione (A, B, C e D), alla modalità di compattazione (statica e giratoria) ed al tempo di attesa prima del costipamento (30 e 60 minuti). Nella prima parte della Tabella 7 sono inoltre riportati anche i parametri ottenuti non considerando la distinzione tra compattazione statica e giratoria, indicati come dati relativi a “tutti i campioni”, e concentrando così l’attenzione sul solo effetto dell’emulsione impiegata.

	Tempo di attesa 30 minuti				Tempo di attesa 60 minuti			
	A	B	C	D	A	B	C	D
TUTTI I PROVINI								
$E_{iniziale}$	1443	1006	550	623	1544	986	-	-
$dE/(d(\log t))$	563	585	510	585	542	759	-	-
$E_{120\text{ gg}}$	2614	2222	1610	1840	2670	2564	-	-
PRESSA STATICA								
$E_{iniziale}$	1540	911	687	700	1154	1004	-	-
$dE/(d(\log t))$	411	567	380	480	850	655	-	-
$E_{120\text{ gg}}$	2395	2091	1477	1698	2920	2366	-	-
PRESSA GIRATORIA								
$E_{iniziale}$	1719	1295	603	539	1943	1004	-	-
$dE/(d(\log t))$	545	660	484	705	231	842	-	-
$E_{120\text{ gg}}$	2852	2668	1609	2005	2423	2755	-	-

Tabella 7 – Parametrici caratteristici del modulo elastico E [MPa] delle miscele riciclate

Occorre in primo luogo sottolineare che tutte le miscele prese in esame hanno evidenziato una certa tendenza ad evolvere nel tempo, con un gradiente del modulo elastico che è risultato nella maggioranza dei casi superiore ai 450 MPa/log(giorno). Per effetto di ciò, a seconda del comportamento a breve termine, fortemente variabile ed associato a valori iniziali del modulo compresi in prevalenza tra i 500 ed i 1500 MPa, si sono ottenuti moduli a lungo termine dell’ordine dei 2000-2500 MPa. Tali valori sono confrontabili con quelli tipicamente riscontrati a 20°C per conglomerati bituminosi di tipo tradizionale miscelati a caldo, generalmente prossimi ai 3500 MPa.

Le caratteristiche meccaniche, così come sintetizzate dai parametri riportati nella Tabella 7, si sono comunque rivelate estremamente sensibili alle variabili prese in esame: il tipo di emulsione, il tempo di attesa prima della compattazione e la tecnica di compattazione. Non è però semplice isolare gli effetti di ciascuna variabile in quanto essi sono correlati tra loro ed influenzati anche dalle proprietà volumetriche delle miscele. Ciononostante, nel seguito vengono presentati alcuni istogrammi di confronto dei dati nei quali vengono messe in evidenza le più importanti variazioni osservate.

Gli istogrammi di Figura 2 consentono di apprezzare gli effetti derivanti dalle variazioni del tipo di emulsione e della modalità di compattazione. Essi in primo luogo mostrano come l’ordine gerarchico stabilito tra i parametri delle miscele preparate con le quattro emulsioni sia sostanzialmente indifferente alla metodologia di compattazione utilizzata. Si è però rilevato che nel passare dal costipamento statico a quello giratorio si ha un generalizzato aumento del gradiente di evoluzione del modulo elastico $dE/d(\log t)$, mentre il segno delle variazioni del modulo iniziale $E_{iniziale}$ sembra essere

dipendente dalla consistenza del residuo bituminoso delle emulsioni (positivo per le miscele con emulsioni A e B, a residuo più consistente; negativo per le miscele contenenti le emulsioni C e D, a residuo ben più deformabile, con valori della penetrazione a 25°C superiori a 200 dmm). Tale distinzione viene invece meno nelle condizioni di maturazione a lungo termine, nelle quali i campioni preparati con tecnica giratoria tendono a essere sempre più rigidi di quelli compattati staticamente.

Si è infine osservato che, a parità di composizione e di ogni altra condizione, le variazioni del tipo di emulsione determinano variazioni del modulo iniziale $E_{iniziale}$ i cui valori sono legati alla rigidità del residuo bituminoso. Ciò è dimostrato anche dall'andamento dei grafici di Figura 3, ove operando a favore della semplicità si è fatto riferimento alla penetrazione quale parametro di rigidità del residuo bituminoso dell'emulsione. Tale relazione non è ovviamente generalizzabile, in particolare nel caso di emulsioni modificate o contenenti additivi in grado di agire in maniera specifica sul bitume invecchiato presente nel fresato.

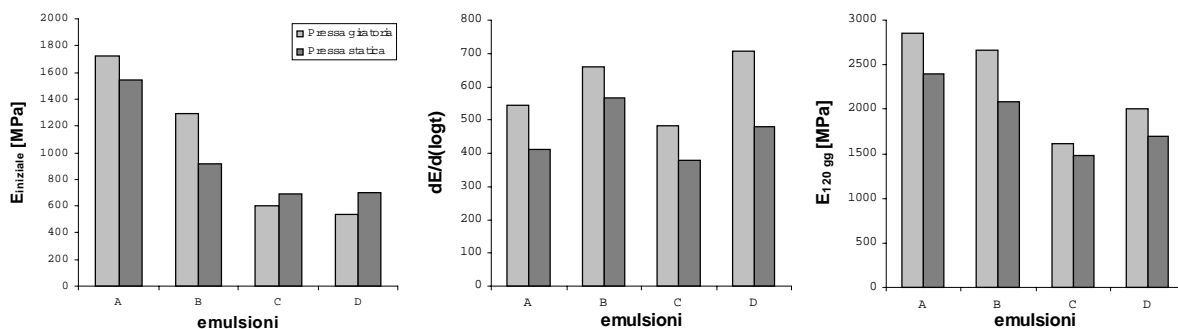


Figura 2 – Variazione dei parametri di evoluzione del modulo elastico con il tipo di emulsione e con il metodo di compattazione

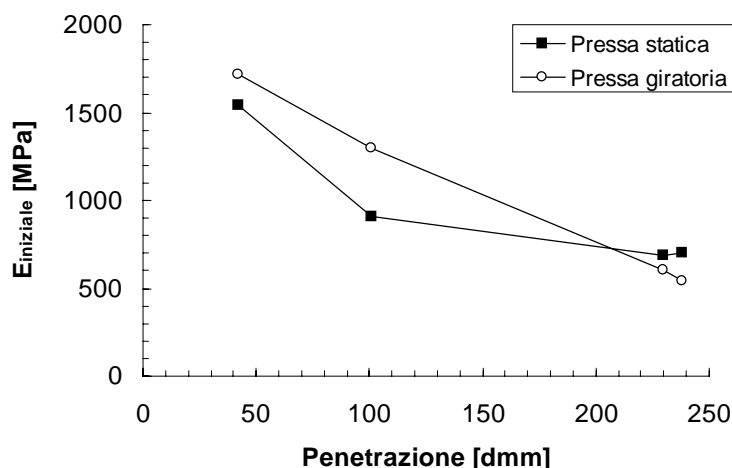


Figura 3 – Relazione tra penetrazione del residuo bituminoso e modulo elastico iniziale

Gli istogrammi di Figura 4 sono relativi allo studio effettuato, per le sole emulsioni A e B, per valutare l'effetto di variazioni del tempo di attesa prima del costipamento. I dati riportati sono quelli medi desunti da tutti i campioni analizzati, senza alcuna distinzione derivante dalla tecnica di compattazione impiegata. Essi non consentono di individuare alcun andamento caratteristico dei parametri di modulo: le variazioni del modulo

iniziale sono infatti modeste mentre quelle del gradiente $dE/d(\log t)$ risultano sensibili solo nel caso dell'emulsione a residuo bituminoso maggiormente deformabile cui è associata una più pronunciata velocità di maturazione. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che i due tempi di attesa presi in esame, benché distinti tra loro, sono comunque maggiori del tempo richiesto per la rottura dell'emulsione: una più marcata evidenziazione degli effetti del tempo di attesa potrebbe invece derivare dall'analisi delle proprietà meccaniche di miscele compattate immediatamente dopo la miscelazione, quando l'azione legante e coesiva del bitume presente nell'emulsione è in via di sviluppo. I risultati ottenuti dimostrano comunque che nel caso in cui si faccia riferimento ad un riciclaggio in impianto fisso, per emulsioni analoghe a quelle considerate (non modificate e prive di additivi rigeneranti), quando i tempi di trasporto sono compresi tra 30 e 60 minuti non si verificano particolari variazioni nelle caratteristiche delle miscele riciclate nelle loro condizioni di addensamento finale.

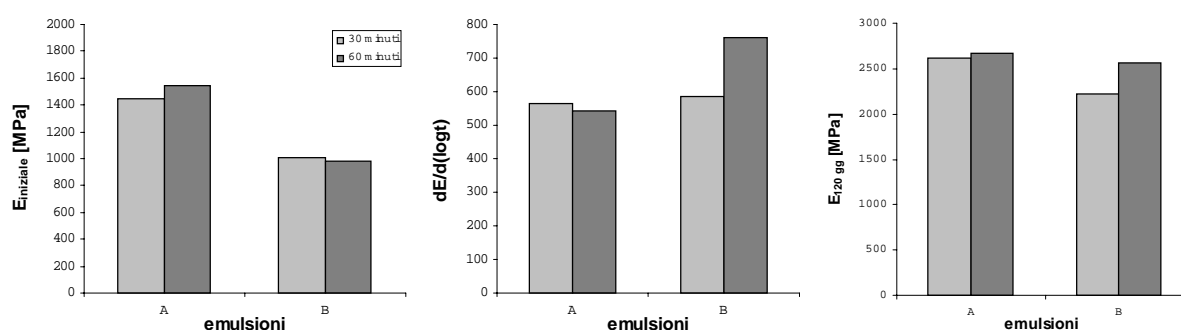


Figura 4 – Variazione dei parametri di evoluzione del modulo elastico con il tipo di emulsione e con il tempo di attesa prima della compattazione

4.3. Resistenza a trazione indiretta

I risultati desunti dalle prove di trazione indiretta sono stati utilizzati per valutare l'evoluzione nel tempo delle caratteristiche di resistenza delle miscele riciclate. Come nel caso precedente si è ricercata una relazione semplice tra il tempo di maturazione e le grandezze di interesse, pervenendo a risultati soddisfacenti nel caso delle relazioni lineari che legano la resistenza a trazione indiretta R_t al logaritmo dei giorni di maturazione. Si sono così potuti introdurre i seguenti parametri che sintetizzano le caratteristiche evolutive della resistenza delle miscele:

- $R_{t_{iniziale}}$, il valore dell'ordinata all'origine della retta di regressione, che rappresenta il valore di resistenza a trazione stimato a 1 giorno di maturazione, ossia la resistenza a brevissimo termine della miscela;
- $dR_t/d(\log t)$, il valore della pendenza della retta di regressione, che rappresenta la velocità di maturazione della miscela;
- $R_{t_{120\text{ gg}}}$, il valore della resistenza a trazione stimato a 120 giorni, che rappresenta il comportamento strutturale a lungo termine del materiale riciclato.

Inoltre, in maniera del tutto analoga, facendo riferimento alle deformazioni a rottura verticali (ϵ_v) ed orizzontali (ϵ_h), si sono introdotti anche i parametri $\epsilon_{v_{iniziale}}$, $d\epsilon_v/d(\log t)$, $\epsilon_{v_{120\text{ gg}}}$, $\epsilon_{h_{iniziale}}$, $d\epsilon_h/d(\log t)$ e $\epsilon_{h_{120\text{ gg}}}$.

I valori dei nove parametri su descritti sono riportati, distinti a seconda dell'emulsione utilizzata, della modalità di compattazione e del tempo di attesa prima della compattazione, nelle Tabelle 8, 9 e 10.

	Tempo di attesa 30 minuti				Tempo di attesa 60 minuti			
	A	B	C	D	A	B	C	D
TUTTI I PROVINI								
Rt_{iniziale}	4,59	3,59	2,84	3,03	4,94	3,64	-	-
DRt/d(logt)	1,39	1,21	1,29	1,62	1,13	1,03	-	-
Rt_{120 gg}	7,47	6,10	5,51	6,40	7,28	5,79	-	-
PRESSA STATICA								
Rt_{iniziale}	4,91	3,49	3,14	3,24	4,63	3,34	-	-
dRt/d(logt)	1,46	1,60	1,12	1,30	1,53	1,71	-	-
Rt_{120 gg}	7,94	6,81	5,47	5,95	7,81	6,90	-	-
PRESSA GIRATORIA								
Rt_{iniziale}	4,33	3,39	2,50	2,87	4,93	3,50	-	-
dRt/d(logt)	1,19	0,98	1,36	1,97	0,70	0,94	-	-
Rt_{120 gg}	6,81	5,42	5,33	6,96	6,39	5,45	-	-

Tabella 8 – Parametrici caratteristici della resistenza R_t [kg/cm^2] delle miscele riciclate

I dati di Tabella 8, relativi alla resistenza a rottura R_t , mostrano come tutte le miscele prese in esame abbiano evidenziato una certa tendenza ad evolvere nel tempo, con un gradiente di crescita $dR_t/d(\log t)$ generalmente superiore ad $1,0 \text{ kg}/\text{cm}^2/\log(\text{giorno})$. I valori della resistenza a trazione, partendo nel breve termine da soglie tipiche di misti cementati (dell'ordine dei $3 \text{ kg}/\text{cm}^2$), sono infatti progrediti fino a livelli vicini a quelli caratteristici dei conglomerati bituminosi di tipo tradizionale (prossimi agli $8 \text{ kg}/\text{cm}^2$). Altre considerazioni più di dettaglio, legate agli effetti dei vari fattori presi in considerazione, possono essere fatte con riferimento agli istogrammi contenuti nelle Figure 5 e 6.

Dall'analisi di Figura 5 emerge che sono confermate alcune osservazioni già fatte nel caso dell'evoluzione del modulo elastico. Al variare del metodo di compattazione rimangono infatti immutati gli ordini gerarchici tra le miscele e questi risultano inoltre sostanzialmente coincidenti con quelli stabiliti per ciascun parametro nel caso del modulo elastico. Anche per la resistenza a trazione indiretta si potrebbe inoltre individuare una correlazione con la penetrazione del residuo bituminoso dell'emulsione del tipo indicata in Figura 3 per il modulo elastico.

Si deve tuttavia osservare che l'incidenza sulla resistenza a rottura della tecnica di compattazione è risultata differente rispetto a quella ottenuta nel caso del modulo elastico. I campioni compattati con la pressa statica hanno infatti fornito, a parità di composizione e tempo di attesa, valori di resistenza generalmente superiori a quelli dei campioni preparati con la pressa a taglio giratorio. Come si evince dai valori di $R_{t_{iniziale}}$ e di $R_{t_{120 \text{ gg}}}$ ciò si è osservato sia a breve sia a lungo termine, sebbene tale effetto sia meno evidente nel caso di impiego di emulsioni con residuo bituminoso a bassa consistenza (C e D).

Questa differenza è certamente dovuta al fatto che nel corso delle prove eseguite per la valutazione dei parametri tenso-deformativi e di resistenza presi in esame (E e R_t) vengono messi in gioco meccanismi di deformazione differenti, sensibili in maniera diversa alle variazioni della struttura interna che possono derivare da cambiamenti della tecnica di compattazione utilizzata.

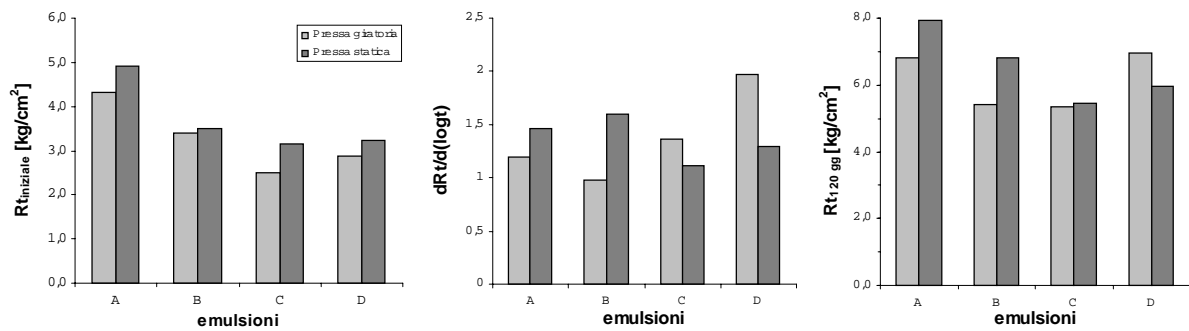


Figura 5 – Variazione dei parametri di evoluzione della resistenza a trazione indiretta con il tipo di emulsione e con il metodo di compattazione

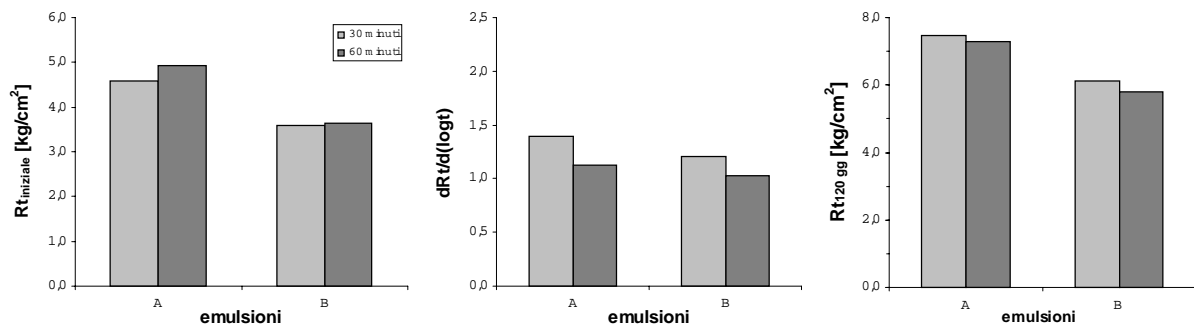


Figura 6 – Variazione dei parametri di evoluzione della resistenza a trazione indiretta con il tipo di emulsione e con il tempo di attesa prima della compattazione

Infine, per quel che riguarda il tempo di attesa prima del costipamento (Figura 6) restano confermate le conclusioni tratte al riguardo del modulo elastico: operando in un intervallo di tempi di maturazione che è successivo a quello in cui avviene la rottura non si rilevano infatti sensibili effetti associati alla variazione di tale parametro.

Nelle Tabelle 9 e 10 vengono riportati i valori dei parametri caratteristici delle deformazioni a rottura. Essi possono essere utilizzati, piuttosto che per una valutazione di dettaglio basata sull'illustrazione di istogrammi tematici, per effettuare alcune considerazioni di carattere generale.

In primo luogo si osserva che per effetto della maturazione nel tempo le miscele tendono a raggiungere le condizioni di rottura con deformazioni verticali via via più elevate (valori positivi di $d\varepsilon_v/d(\log t)$) e con deformazioni orizzontali via via più contenute (valori negativi di $d\varepsilon_h/d(\log t)$). È inoltre evidente che nel breve termine le condizioni di rottura dei campioni preparati con le due tecniche di compattazione utilizzate sono nettamente differenti tra loro: quelli compattati con metodo giratorio esibiscono infatti una maggiore duttilità soprattutto per ciò che concerne le deformazioni orizzontali. Nel lungo termine questa distinzione tende ad attenuarsi con un comportamento a rottura sostanzialmente coincidente delle due tipologie di campioni. Queste considerazioni sono riassunte nella Figura 7, nella quale sono rappresentati graficamente i valori di deformazione a rottura a breve e lungo termine delle varie serie di campioni analizzate.

	Tempo di attesa 30 minuti				Tempo di attesa 60 minuti			
	A	B	C	D	A	B	C	D
TUTTI I PROVINI								
$\epsilon_{V_{iniziale}}$	1,59	1,79	1,67	1,87	1,34	1,96	-	-
$d\epsilon_V/d(\log t)$	0,30	0,14	0,53	0,10	0,37	0,16	-	-
$\epsilon_{V_{120\text{ gg}}}$	2,22	2,08	2,77	2,07	2,12	2,30	-	-
PRESSA STATICA								
$\epsilon_{V_{iniziale}}$	1,05	1,54	1,37	1,62	1,28	2,20	-	-
$d\epsilon_V/d(\log t)$	0,56	0,29	0,54	0,17	0,36	-0,01	-	-
$\epsilon_{V_{120\text{ gg}}}$	2,21	2,16	2,50	1,97	2,03	2,19	-	-
PRESSA GIRATORIA								
$\epsilon_{V_{iniziale}}$	1,68	2,12	1,89	2,49	1,19	1,68	-	-
$d\epsilon_V/d(\log t)$	0,36	0,02	0,45	-0,23	0,61	0,32	-	-
$\epsilon_{V_{120\text{ gg}}}$	2,43	2,16	2,84	2,00	2,47	2,34	-	-

Tabella 9 – Parametrici caratteristici della deformazione verticale a rottura ϵ_v (%) delle miscele riciclate

	Tempo di attesa 30 minuti				Tempo di attesa 60 minuti			
	A	B	C	D	A	B	C	D
TUTTI I PROVINI								
$\epsilon_{h_{iniziale}}$	0,49	0,47	0,71	0,53	0,50	0,67	-	-
$d\epsilon_h/d(\log t)$	-0,04	-0,01	-0,15	-0,05	-0,08	-0,17	-	-
$\epsilon_{h_{120\text{ gg}}}$	0,41	0,44	0,39	0,42	0,33	0,32	-	-
PRESSA STATICA								
$\epsilon_{h_{iniziale}}$	0,46	0,43	0,51	0,45	0,46	0,61	-	-
$d\epsilon_h/d(\log t)$	-0,03	-0,01	-0,03	-0,01	-0,04	-0,13	-	-
$\epsilon_{h_{120\text{ gg}}}$	0,39	0,41	0,46	0,42	0,37	0,35	-	-
PRESSA GIRATORIA								
$\epsilon_{h_{iniziale}}$	0,64	0,69	0,90	0,81	0,53	0,70	-	-
$d\epsilon_h/d(\log t)$	-0,08	-0,10	-0,23	-0,21	-0,10	-0,19	-	-
$\epsilon_{h_{120\text{ gg}}}$	0,46	0,49	0,43	0,37	0,33	0,29	-	-

Tabella 10 – Parametrici caratteristici della deformazione verticale a rottura ϵ_h (%) delle miscele riciclate

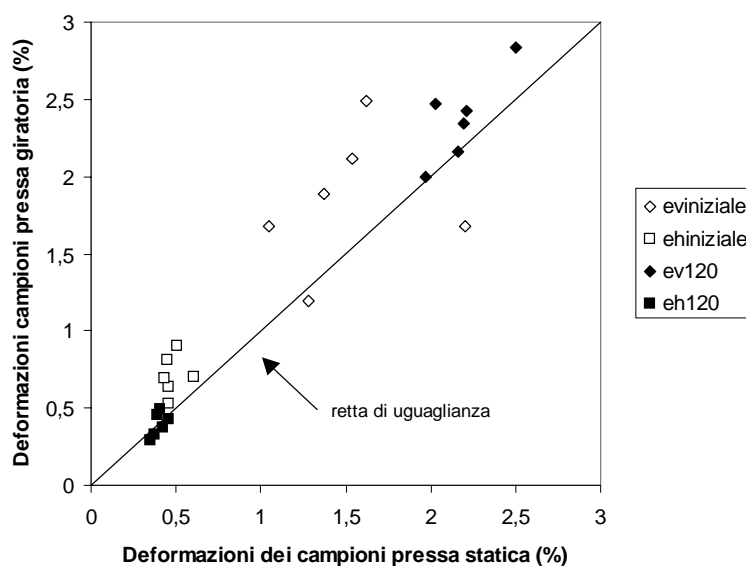


Figura 7 – Effetto della tecnica di compattazione e della maturazione sui parametri caratteristici delle deformazioni a rottura

4.4. Volumetria e lavorabilità

Le proprietà volumetriche delle miscele riciclate sono state determinate in due differenti condizioni: immediatamente dopo il costipamento, in condizioni umide tipiche del breve termine, e in condizioni secche dopo essiccazione a 40°C per prendere in esame situazioni caratteristiche del lungo termine. Si sono inoltre espresse le varie grandezze facendo riferimento sia alle norme CNR sia a quelle ASTM, per il rispetto delle quali è stato necessario valutare, ovviamente in condizioni secche, la massima massa volumica teorica (*TMD, Theoretical Maximum Density*) delle miscele riciclate a freddo (Tabella 11). I valori medi delle grandezze volumetriche misurate e calcolate sono riportate nelle Tabelle 12 (condizioni umide) e 13 (condizioni secche).

La variazione che nel tempo si ha del contenuto d'acqua delle miscele si riflette sulla variazione della massa volumica *MV*, che tende naturalmente a diminuire, ma anche della percentuale dei vuoti %*v* e dei vuoti riempiti di bitume *VFA*. Questi ultimi dovrebbero essere più propriamente indicati, nelle fasi in cui vi è ancora un'umidità residua non nulla, come vuoti riempiti di bitume ed acqua. Occorre infine evidenziare che le osservate variazioni della *VMA* sono dovute alla sola dispersione dei risultati sperimentali, essendo tale parametro, a parità di emulsione e tecnica di compattazione, indipendente dalle condizioni di umidità residua.

Le su citate variazioni volumetriche, evidenziate anche dalla perdita in peso subita dai campioni durante la maturazione, concorre alla variazione della risposta meccanica rilevata mediante la valutazione del modulo elastico e della resistenza a trazione indiretta. Tali variazioni sono inoltre influenzate dall'evoluzione delle caratteristiche reologiche e di resistenza della matrice legante che non sono state oggetto di valutazione diretta in questa fase della ricerca.

	TMD riciclato [g/cm ³]	MV aggregati estratti [g/cm ³]
A	2,563	2,759
B	2,545	2,778
C	2,541	2,826
D	2,566	2,792

Nota: masse volumiche valutate su miscele sciolte in condizioni secche

Tabella 11 – Caratteristiche volumetriche delle miscele non compattate

	MV [g/cm ³]	% <i>v</i> (%)	VMA (%)	VFA (%)
Pressa statica		ASTM	CNR	ASTM CNR
A	2,27	11,5	9,8	22,5 48,8 56,6
B	2,28	10,6	10,2	22,7 53,4 55,3
C	2,26	10,9	11,8	24,5 55,4 52,1
D	2,29	10,7	9,8	22,6 52,7 56,9
Pressa giratoria		ASTM	CNR	ASTM CNR
A	2,31	9,9	8,2	21,1 53,0 61,4
B	2,35	7,7	7,3	20,2 61,8 64,0
C	2,31	9,1	9,9	22,9 60,5 56,9
D	2,32	9,6	8,6	21,7 55,8 60,2

Tabella 12 – Caratteristiche volumetriche in condizioni umide delle miscele compattate

	MV [g/cm ³]	%v (%)	VMA (%)	VFA (%)		
Pressa statica		ASTM	CNR	ASTM	CNR	
A	2,22	13,3	11,6	24,1	44,8	52,0
B	2,23	12,3	11,9	24,2	49,1	50,9
C	2,22	12,6	13,4	25,9	51,5	48,4
D	2,23	13,1	12,1	24,7	47,1	50,8
Pressa giratoria		ASTM	CNR	ASTM	CNR	
A	2,29	10,7	8,9	21,8	50,9	59,0
B	2,31	9,3	8,8	21,6	57,1	59,1
C	2,24	11,8	12,6	25,2	53,3	50,1
D	2,29	10,8	9,8	22,7	52,6	56,7

Tabella 13 – Caratteristiche volumetriche in condizioni secche delle miscele compattate

È confortante constatare che al variare del tipo di emulsione non si sono registrate rilevanti variazioni delle proprietà volumetriche delle miscele: queste avrebbero infatti complicato l'interpretazione dei risultati introducendo un ulteriore fattore del quale tenere conto. Ciò è dovuto al fatto che all'atto della compattazione delle miscele tutte le emulsioni considerate, non modificate e con lo stesso tenore di acqua, avevano caratteristiche di viscosità piuttosto vicine le une alle altre. Resta quindi confermato che l'impiego di emulsioni aventi un residuo bituminoso più deformabile non garantisce a priori l'ottenimento di condizioni di più marcato addensamento. È invece indispensabile valutare preventivamente l'attitudine al costipamento delle miscele, eventualmente variando anche lo sforzo unitario di compattazione trasmesso al materiale.

Per quanto riguarda la tecnica di compattazione, essa ha dimostrato di avere una significativa influenza sulla volumetria delle miscele nello stato addensato. In particolare, si è rilevato che l'impiego della tecnica giratoria porta, rispetto al caso di compattazione con pressa ad azione statica, a condizioni di addensamento caratterizzate da una maggiore massa volumica, da una più ridotta percentuale dei vuoti e da una riduzione, seppure modesta, della *VMA*. Tali variazioni indicano chiaramente che la struttura della miscela, grazie alla riorganizzazione interna dei grani di aggregato derivante dall'azione giratoria, risulta in questo caso più compatta. Si noti inoltre che ciò si verifica a parità di tempo di compattazione, pari a 5 minuti per entrambe le tecniche di compattazione, ma con una pressione unitaria molto più bassa (600 kPa nel caso della pressa giratoria; 6050 kPa nel caso della pressa statica).

Nel confronto tra le due tecniche di compattazione i risultati ottenuti in termini volumetrici sono in linea con le osservate caratteristiche meccaniche (tenso-deformative e di resistenza). Mantenendo inalterata la composizione della miscela (dosaggi e tipologia dei componenti), a strutture più compatte sono infatti associati, come atteso, valori più elevati della rigidità così come rilevata dalla prova di trazione indiretta ripetuta (v. paragrafo 4.2). Questa correlazione viene meno nel caso dei risultati delle prove di trazione indiretta, i quali sembrano essere più sensibili alla struttura interna delle miscele piuttosto che alla loro volumetria. L'incidenza di quest'ultima non può pertanto essere valutata in quanto per ciascuna composizione di miscela i campioni sono stati preparati ad un unico livello di addensamento.

Ulteriori informazioni possono essere tratte dall'analisi delle curve di addensamento ottenute dall'impiego della pressa a taglio giratorio, rappresentate nel piano $\log N_g - \%C$,

essendo N_g il numero progressivo dei giri di compattazione e $\%C$ la percentuale (o grado) di compattazione, data dal complemento a 100 della percentuale dei vuoti. In questa rappresentazione le curve di addensamento possono essere considerate pressoché rettilinee ed il loro andamento può essere sintetizzato dalla pendenza K , che costituisce una misura della lavorabilità della miscela, e dall'ordinata all'origine C_1 . Quest'ultimo parametro, che coincide con la percentuale di compattazione al primo giro della pressa, esprime il grado di autoaddensamento della miscela, ossia la sua tendenza ad addensarsi sotto l'effetto del peso proprio. I valori medi assunti da tali parametri per le varie miscele prese in esame sono riportate nella Tabella 14.

La sostanziale uniformità dei dati rilevati, contenuti entro intervalli piuttosto ristretti per entrambi i parametri, dimostra come nella fase di compattazione, anche sotto l'effetto dell'azione girettoria della pressa, non vi siano stati comportamenti differenti delle varie emulsioni impiegate. Ciò è perfettamente in accordo con quanto osservato facendo riferimento alle caratteristiche volumetriche delle miscele nello stato di addensamento finale e con la fisica del fenomeno di addensamento, per il quale non erano attese grandi variazioni rimanendo praticamente invariati il fresato impiegato e la viscosità del fluido presente nella fase di compattazione.

	K	C₁ (%)
A	9,63	73,0
B	8,91	76,0
C	9,22	73,7
D	8,86	74,1

Tabella 14 – Parametri caratteristici delle curve di addensamento

5. CONCLUSIONI

Le indagini sperimentali descritte nella presente memoria hanno consentito di trarre alcune conclusioni circa l'influenza del tipo di emulsione sulle caratteristiche delle miscele riciclate a freddo. Si è infatti visto che i vari prodotti denominati genericamente come “emulsioni da riciclaggio” possono risultare assai diversi tra loro e conducono di conseguenza a proprietà estremamente differenti delle miscele riciclate. Ciò è stato rilevato, mantenendo inalterati i dosaggi e le tipologie degli altri componenti delle miscele, sia nel breve sia nel lungo termine nel caso delle caratteristiche meccaniche (tenso-deformative e di resistenza). Per quanto riguarda invece le caratteristiche volumetriche (di lavorabilità e di addensamento finale), esse si sono dimostrate relativamente insensibili a variazioni delle caratteristiche delle emulsioni in quanto queste sono state mantenute di tipo non modificato e con una percentuale costante di residuo bituminoso.

Nel breve termine, immediatamente dopo il costipamento, i valori del modulo elastico a 20°C e della resistenza a trazione indiretta alla medesima temperatura si sono dimostrati direttamente dipendenti dalla rigidità del residuo bituminoso dell'emulsione. Per effetto della maturazione della matrice legante delle miscele tali grandezze hanno inoltre evidenziato un aumento nel tempo la cui entità si è dimostrata di difficile previsione e variabile da un prodotto all'altro. Con riferimento alle proprietà a rottura la maturazione ha infine determinato una variazione delle condizioni di deformazione ultima, che per la maggioranza delle miscele si è tradotta in una riduzione

delle deformazioni orizzontali accompagnata da un aumento di quelle verticali. Le considerazioni su esposte sono state confermate impiegando due diverse tecniche di compattazione (di tipo statico e giratorio) che hanno tuttavia fornito, come atteso, risultati differenti tra loro.

Sulla base delle osservazioni compiute, gli Autori ritengono che sia opportuno basare la scelta dell'emulsione ottimale da riciclaggio su misure sperimentali analoghe a quelle su descritte. Esse potranno essere integrate da altre prove, già in corso presso il Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino, che prevedano l'accelerazione della maturazione delle miscele mediante trattamento termico [Santagata, 1999], la valutazione delle caratteristiche di resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti e alla fessurazione a fatica, nonché l'analisi della reologia del legante risultante dal processo di riciclaggio. È infine auspicabile che le attrezzature e prove descritte vengano utilizzate per la definizione di un sistema di mix design delle miscele riciclate a freddo nell'ambito del quale si possa tenere conto del ruolo svolto da ciascun componente.

6. BIBLIOGRAFIA

PRIN, Programma di Ricerca Scientifica di Rilevante Interesse Nazionale, “Linee Guida e Criteri di Impiego dei Materiali di Riciclaggio nel Settore Stradale”, 2001.

Santagata, E., “Il Mix Design Strutturale dei Conglomerati Bituminosi”, *Atti del Convegno SIV “I Materiali nella Sovrastruttura Stradale”*, 1996, V.171-180.

Santagata, E., “Caratteristiche Meccaniche dei Riciclati a Freddo”, *Le Strade*, n. 1345, marzo 1999, pp. 70-72.

Santagata, E., Bassani, M., “Improved Use of the Repeated Load Indirect Tensile Test”, *Proceedings, 3rd European Symposium on “Performance and Durability of Bituminous Materials and Hydraulic Stabilised Composites”*, 1999, pp. 493-515.

Santagata, E., “Indagine sperimentale sui materiali rigenerati a freddo messi in opera sull'autostrada A4 Torino – Milano”, *Rapporto di ricerca finale anno 1999*, 2000.

Santagata, E., Chiappinelli, G., “Indagine sperimentale sui materiali rigenerati a freddo messi in opera sull'autostrada A4 Torino – Milano”, *Rapporto di ricerca finale anno 2000*, 2001.

Santagata, E., Chiappinelli, G., Garozzo, M., Mori, M., “L'esperienza del gruppo ASTM nel riciclaggio a freddo delle pavimentazioni. Indagini sperimentali per il controllo preventivo, in corso d'opera ed in esercizio”, *Preprints del Convegno INFRAVIA 2001*, vol. 3.