

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e Dei Materiali

TESI DI LAUREA

in

Costruzioni Di Strade, Ferrovie, Aeroporti M

**Il Polverino di Gomma nel Riciclaggio a Freddo: Metodo
Sperimentale**

Candidato

MARCO TARTAGLIA

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing. **GIULIO DONDI**

Correlatori

Prof. Ing. **ANDREA SIMONE**

Ing. **MATTEO PETTINARI**

Sessione II

Anno Accademico 2011/2012

SOMMARIO

SOMMARIO	1
INTRODUZIONE	11
CAPITOLO 1 IL PROBLEMA DEI RIFIUTI.....	15
1.1 Sviluppo Sostenibile: esigenze economiche, sociali e ambientali.....	15
1.1.1 Introduzione.....	15
1.1.2 Sostenibilità Nel Contesto Delle Pavimentazioni Stradali	21
1.1.3 Politiche Pubbliche Per La Sostenibilità	27
1.2 Pavimentazioni Stradali E Loro Deterioramento.....	29
1.2.1 I Componenti Della Pavimentazione.....	29
1.2.2 Deterioramento Delle Pavimentazioni Stradali	34
1.2.3 Manutenzione E Risanamento Delle Pavimentazioni Stradali.....	38
1.3 Rifiuti Di Demolizione E Ricostruzione (C&D)	41
1.3.1 Europa	42

1.3.1.1	Produzione di Rifiuti C&D	42
1.3.1.2	Recupero di Rifiuti C&D	44
1.3.2	Italia.....	47
1.3.2.1	Rifiuti Speciali e MUD	47
1.3.2.2	Produzione Totale di Rifiuti Speciali.....	48
1.3.2.3	Composizione dei Rifiuti da C&D.....	52
1.3.2.4	Recupero dei Rifiuti da C&D.....	58
1.4	Il Fresato o RAP.....	60
1.4.1	Definizione	60
1.4.2	Proprietà del “RAP”	62
1.5	Pneumatici.....	65
1.5.1	Definizione	65
1.5.2	Composizione degli Pneumatici.....	67
1.5.3	Gestione degli Pneumatici.....	69
1.5.4	Le Modalità di Recupero dei PFU.....	73
1.6	Conclusioni.....	74
CAPITOLO 2 IL QUADRO NORMATIVO		77
2.1	Introduzione	77
2.2	Leggi Comunitarie e Nazionali.....	78
2.2.1	Unione Europea – Direttive, Normative ed Attività delle Commissioni	79

2.2.2	Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997, n. 22	81
2.2.3	Decreto Ministeriale 5 Febbraio 1998, con Modifiche Introdotte dal D.M. 9 Gennaio 2003, dal D.M. 27 Luglio 2004 e dal D.M. 5 Aprile 2006, n. 186.....	82
2.2.4	Codici CER di Interesse per le Opere Stradali	85
2.2.5	Verifiche di Compatibilità Ambientale	90
2.2.6	La Marcatura CE degli Aggregati Riciclati e del Conglomerato Bituminoso Fresato	94
2.2.7	Testo Unico sull’Ambiente – Decreto Legislativo 3 Aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale.	97
2.2.8	Il Passaggio dal MUD al Sistri	102
2.2.9	Decreto Legislativo 16 Gennaio 2008, n. 4 “Ulteriori disposizioni correttive ed integrative del decreto legislativo 3 aprile 2006, n.152, recante norme in materia ambientale”	104
2.2.10	Pneumatici Dismessi	108
2.3	Incentivi al Recupero.....	110
2.3.1	Le Disposizioni Contenute nella Legge 448/2001	110
2.3.2	Decreto del Ministro dell’Ambiente 203/2003 (Repertorio di Riciclaggio)	111
2.3.3	Circolare n. 5205 del 15 Luglio 2005, Pubblicata in GU n. 171 del 2005 ...	113
2.3.4	Circolare del 19 Luglio 2005, Pubblicata in GU n.173 del 27 Luglio 2005	114
2.3.5	Disposizioni Regionali, Locali e Prassi Applicativa	115
2.3.6	Gli Accordi di Programma	117

CAPITOLO 3 RICICLAGGIO DEL FRESATO	119
3.1 Introduzione	119
3.2 Fattibilità e Sostenibilità del Riciclaggio	124
3.3 Riciclaggio del Fresato in Italia	129
3.3.1 Introduzione al Riciclaggio	129
3.3.2 Il Fresato di Asfalto nella Recente Giurisprudenza.....	132
3.4 Tecniche di Riciclaggio a Freddo	136
3.4.1 Introduzione.....	136
3.4.2 Stabilizzazione con Emulsione Bituminosa	142
3.4.3 Stabilizzazione con Bitume Schiumato.....	146
3.4.4 Considerazioni sull'Umidità nei BSMs.....	151
3.5 Pregi e Difetti del Riciclaggio a Freddo in Sito	153
3.5.1 I Pregi	153
3.5.2 I Difetti	156
3.6 Il Riciclaggio in Sito.....	157
3.6.1 Introduzione.....	157
3.6.2 Campi di Applicazione	160
3.6.3 Fresatura	161
3.6.4 Rigenerazione	163
3.6.5 Stesa del Conglomerato Bituminoso	164
3.6.6 Rullatura del Conglomerato Bituminoso.....	165

3.7	Tecniche di Riciclaggio a Freddo: Tipologie di Treni	167
3.7.1	Introduzione.....	167
3.7.2	Single Unit.....	168
3.7.3	Multi Unit.....	174
3.8	Conclusioni	177
 CAPITOLO 4 RICICLAGGIO A FREDDO: ANALISI DELLA MISCELA		179
4.1	Stabilizzazione con emulsione bituminosa e cemento.....	179
4.1.1	Gli elementi della miscela	179
4.2	L'Emulsione bituminosa	181
4.2.1	Descrizione	181
4.2.2	Il Bitume.....	182
4.2.3	Le altre componenti dell'emulsione	186
4.2.4	Proprietà delle emulsioni	190
4.2.5	Le emulsioni anioniche	193
4.2.6	Le emulsioni cationiche.....	195
4.2.7	Produzione delle emulsioni di bitume	198
4.2.8	Stoccaggio e trasporto delle emulsioni di bitume	200
4.3	Ruolo dell'emulsione	202
4.3.1	Definizione	202

4.3.2	Influenza del tipo e del dosaggio di emulsione sulle caratteristiche volumetriche e meccaniche della miscela.....	204
4.4	Il cemento Portland	212
4.4.1	Definizione	212
4.4.2	La Produzione.....	214
4.4.3	Presatura e indurimento	216
4.4.4	Influenza della temperatura sull'idratazione del cemento.....	223
4.5	Aggregati	226
4.5.1	Definizione	226
4.5.2	Caratteristiche degli aggregati.....	228
4.6	Il ruolo della granulometria.....	232
4.6.1	Definizione e influenza sulle caratteristiche della miscela.....	232
4.7	Il Filler (attivo o naturale)	237
4.7.1	Definizione	237
4.7.2	Caratteristiche del filler	238
4.7.3	Influenza del filler sulle proprietà reologiche dei bitumi	239
4.8	Gli Additivi.....	240
4.9	L'acqua	241
4.10	Polverino di gomma criogenizzato	242
4.10.1	La granulazione criogenica	242
4.11	Conclusioni.....	245

CAPITOLO 5 PROGRAMMA SPERIMENTALE	247
5.1 Il programma sperimentale	247
5.1.1 Introduzione.....	247
5.1.2 Obbiettivi generali.....	248
5.1.3 Articolazione generale del programma	249
5.2 Fase 1: Organizzazione del progetto	250
5.2.1 Mix Design.....	251
5.2.1.1 RAP e polverino di gomma (CCR).....	253
5.2.1.2 Cemento e Filler.....	259
5.2.1.3 L'emulsione Bituminosa	259
5.2.1.4 L'acqua.....	260
5.2.1.5 Definizione dell'umidità ottima, densità secca e quantità di cemento..	260
5.2.2 Descrizione del Programma e Maturazione	263
5.3 Fase 2: Realizzazione dei campioni e Analisi della Compattazione con pressa Giratoria	265
5.3.1 La Preparazione dei Provini	265
5.3.1.1 Preparazione della Miscela	265
5.3.1.2 Denominazione dei Provini.....	269
5.3.1.3 Confezionamento dei Provini con Pressa Giratoria (secondo norma UNI EN 12697-31).....	270
5.3.1.4 Addensamento e Lavorabilità	275

5.3.1.5	Curve di Addensamento	277
5.3.2	Analisi delle Proprietà Volumetriche	279
5.3.2.1	Provini con 3.5% di Emulsione Bituminosa: Curve di Addensamento	279
5.3.2.2	Provini con 5.0% di Emulsione Bituminosa: Curve di Addensamento	281
5.3.2.3	Valutazione delle Densità Massime per ciascuna Miscela	283
5.3.2.4	Provini con 3.5% di Emulsione Bituminosa: Curve di Addensamento (Gmm %).....	286
5.3.2.5	Provini con 5.0% di Emulsione Bituminosa: Curve di Addensamento (Gmm %).....	288
5.3.2.6	Variazione del Grado di Addensamento in seguito alla Maturazione ..	290
5.3.3	Osservazioni	295
5.4	Fase 3: Test di Resistenza a Trazione Indiretta	296
5.4.1	Descrizione del Test - ITS.....	296
5.4.1.1	Introduzione ed obiettivi	296
5.4.1.2	La Trazione Indiretta.....	297
5.4.2	Test ITS: Curve di Carico e Deformazione.....	299
5.4.3	Test ITS: Curve Tensione e Deformazione	302
5.4.4	Test ITS: Valori delle Tensioni Massime a rottura	306
5.4.5	Test ITS: Andamento delle tensioni massime a rottura	310
5.4.6	Considerazioni finali	315
5.5	Fase 4: Test ITSM per la Determinazione del Modulo di Rigidezza	316

5.5.1	Definizioni e Teoria per la determinazione del modulo di rigidezza	316
5.5.2	Descrizione del test ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus).....	320
5.5.2.1	Descrizione delle Apparecchiature di Prova	320
5.5.2.2	Preparazione del Provino	322
5.5.2.3	Modalità di svolgimento del Test.....	324
5.5.3	I risultati del test ITSM	326
5.5.3.1	Impostazione del software	326
5.5.3.2	Valori di ITSM dopo 6, 24, 80 e 120 giorni	327
5.5.3.3	Risultati ed analisi sulla sensibilità termica dei materiali	332
5.5.4	Conclusioni sui risultati.....	335
5.6	Fase 5: Test ITFT per la determinazione delle leggi di fatica del materiale	336
5.6.1	Introduzione ed Obiettivi.....	336
5.6.2	I provini sottoposti a ITFT	337
5.6.3	La fatica.....	339
5.6.3.1	Definizione.....	339
5.6.3.2	Sviluppo del danno per fatica in sito.....	341
5.6.3.3	Prova per la determinazione della vita a fatica a trazione indiretta	343
5.6.3.4	Tipo e Modalità di carico	346
5.6.4	Esecuzione della Prova.....	349
5.6.4.1	Scelta della modalità di carico	349
5.6.4.2	Scelta del criterio di rottura.....	350

5.6.4.3	Allestimento del provino e configurazione software	352
5.6.5	Risultati della prova ITFT	354
CONCLUSIONI.....		359
BIBLIOGRAFIA.....		363

INTRODUZIONE

I ritmi imposti dalla moderna società tecnologica realizzano un connubio indissolubile con l'esigenza di spostamenti sempre più rapidi e lo sviluppo di infrastrutture stradali sicure e durevoli nel tempo. In ogni caso le tradizionali metodologie di manutenzione producono un elevato quantitativo di materiali di risulta, il cui smaltimento, a carico delle imprese, è disciplinato da precise disposizioni di legge. Inoltre, la scarsa disponibilità di materiali, unita ad una crescente preoccupazione di natura ambientalistica e, non ultimo, da ragioni di risparmio economico, hanno polarizzato l'attenzione verso tecniche di riciclaggio sempre più innovative. In aggiunta al materiale proveniente dalla scarificazione/fresatura della rete viaria su cui si basa in larga misura il sistema economico dell'Italia, bisogna considerare anche il materiale proveniente dall'esercizio della attività vera e propria di trasporto. Ogni anno raggiungono il fine vita utile circa 380.000 tonnellate di pneumatici risultanti dalla sostituzione sui veicoli in circolazione, per lo più autovetture. Il recupero di questi materiali si propone come un'interessante alternativa da considerare in campo stradale in sede progettuale perché permette di abbattere i costi connessi al reperimento di nuovi aggregati lapidei, di smaltimento di quelli usati, e contribuisce a tutelare l'ambiente.

Recentemente, a fianco del riciclaggio a caldo in sito, ha riscosso sempre più successo quello a freddo, che rispetto al primo presenta numerosi vantaggi (è meno inquinante, è più sicuro, è più economico, ecc.) ma del quale si stanno ancora migliorando metodologie operative, indagando soprattutto le proprietà meccaniche a lungo termine.

La prima parte della tesi è dedicata alla raccolta di dati che attengono problematiche e norme sui rifiuti di costruzione e demolizione, in particolare i rifiuti derivanti da conglomerati bituminosi. Spiega le tecniche di riciclaggio a freddo in sito, dei materiali di risulta da scarifica stradale. Particolare attenzione viene posta al metodo della stabilizzazione con emulsione e cemento per la quale vengono definite proprietà e ruolo di ogni elemento.

Lo scopo del programma sperimentale, oggetto di tesi, è quello di fornire indicazioni e riferimenti in merito alla tecnica di riciclaggio a freddo con emulsione bituminosa e cemento, valutando le possibilità di una sua applicazione in combinazione con il polverino di gomma criogenizzato, in un'ottica di un corretto e potenzialmente più esteso recupero dei pneumatici fuori uso (PFU), indagando il comportamento e la variazione di alcune proprietà meccaniche quali: le Modalità di Addensamento, la Resistenza a Trazione Indiretta (Indirect Tensile Strength, ITS), il Modulo del materiale (indirect tensile stiffness modulus, ITSM), il Comportamento a Fatica (indirect tensile fatigue tests, ITFT), per diverse combinazioni di emulsione, cemento e polverino di gomma (Crumb Rubber).

La sperimentazione si articola complessivamente in tre fasi: una di analisi preliminare della composizione delle miscele da realizzare, una di confezionamento dei provini e loro addensamento, una di test durante la quale i provini verranno sottoposti a prove ITS, prove ITSM e prove di fatica, e contestualmente verranno analizzati i risultati ottenuti.

Nella prima fase viene effettuata un'analisi preliminare volta a definire le percentuali di fresato ed eventuali aggregati vergini di correzione da utilizzarsi nella preparazione delle miscele. Per il confezionamento dei provini sarà utilizzata la pressa giratoria che riproduce l'effetto dei rulli durante il costipamento in sito, attraverso il cui utilizzo è possibile studiare le proprietà di auto compattazione e lavorabilità delle miscele, oggetto dello studio operato nella seconda fase.

Nella terza fase di studio si valuterà la variazione della resistenza a trazione indiretta delle diverse miscele, considerando l'influenza dei diversi dosaggi di emulsione bituminosa, cemento e polverino di gomma. Si è deciso di adottare la medesima modalità di maturazione per i diversi provini. I campioni rimarranno chiusi 3 giorni in busta sigillata di plastica a 40°C, poi tolti da questa e conservati a 40°C per altri 3 giorni infine conservati a temperatura ambiente (20°C) per il tempo rimanente. Per alcuni dosaggi di polverino, nello specifico in percentuale dello 0 e del 3%, verranno eseguiti test per la valutazione dei moduli del materiale ITSM e test dinamici per la determinazione delle leggi di Fatica ITFT.

Saranno valutate 4 miscele di conglomerato bituminoso differenti ottenute variando la percentuale di emulsione bituminosa nei tenori del 3.5% e 5.0% e la percentuale di cemento nel 1.5% o nel 3.0%. Per queste quattro macrocategorie, verranno realizzati provini con percentuali di polverino variabile: 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, e 5%.

Complessivamente saranno realizzati 144 provini di cui 48 verranno tagliati mediante sega a disco (96 campioni complessivi) e destinati alle prove ITSM e ITFT mentre i rimanenti 96 saranno sottoposti a test di trazione indiretta ITS.

Per le prove ITSM e ITFT saranno prese in considerazione solamente 2% di polverino ovvero lo 0% e il 3%. La determinazione delle curve a fatica verrà effettuata attraverso l'analisi di 12 risultati ottenuti su campioni della stessa miscela effettuando il test con quattro tensioni di carico differenti e ripetendo la prova per ogni tensione tre volte.

Le prove di trazione indiretta, saranno valutate su tutte le miscele con diverse percentuali di polverino e la prova sarà svolta su tre campioni differenti in modo da avere tre valutazioni del carico indipendenti.

CAPITOLO 1

IL PROBLEMA DEI RIFIUTI

1.1 SVILUPPO SOSTENIBILE: ESIGENZE ECONOMICHE, SOCIALI E AMBIENTALI

1.1.1 INTRODUZIONE

Il mondo moderno è governato da ritmi sempre più frenetici ad ogni livello della vita sociale. L'evoluzione della società, nel contesto di un livello di globalizzazione estremamente elevato che ha portato e continua a portare ad un progressivo livellamento delle differenze culturali, necessita quotidianamente di utenze e servizi alle singole persone.

Questo significa che i bisogni principali del singolo, non coincidenti necessariamente con quelli primari, vengono spesso ad essere molto simili, sino ad identificarsi, per ogni individuo che agisca all'interno di nuclei territoriali e comunitari complessivamente simili.

Altrimenti detto, individui simili in società sempre più simili e interconnesse presenteranno necessità e bisogni sempre più simili, cui è possibile fare fronte tramite un sistema di servizi e utilità che, appunto, causa dell'alta globalizzazione, rappresenteranno soluzioni necessariamente anch'esse tra loro molto simili. Questo risulta particolarmente

vero in rapporto ai paesi emergenti, dove è in atto una grande ascesa sociale che punta a raggiungere i nostri stessi “standard” di vita, e quindi agli stessi nostri bisogni, che saranno estesi alla maggioranza di quelle popolazioni che oggi presentano il più alto tasso di crescita demografica. Il presupposto perché le soluzioni ai suddetti bisogni siano percorribili in un ottica temporale indefinita che valorizzi il futuro, è racchiuso nel concetto di SOSTENIBILITA’.

Sostenibilità è essenzialmente la capacità di durare e resistere nel tempo. La parola deriva dal latino *sustinēre* (da *sus*, *su* e *tenēre*, tenere), e ci sono numerose definizioni date nel nostro dizionario, incluse “dare supporto”, “prolungare”, e “supportare/sostenere”. Oggi il termine, molto inflazionato, è applicato genericamente a pressoché ogni aspetto della vita, nonostante sia sempre più spesso impiegato nel contesto della sostenibilità umana sulla Terra. La crescita della popolazione sta causando un esaurimento sempre più rapido delle risorse non rinnovabili presenti sul pianeta, mentre le risorse rinnovabili accessibili a tutti vengono sempre più spesso sottoposte a tassi di utilizzo che non ne permettono la normale rigenerazione. Il rischio di uno squilibrio tra il fabbisogno di risorse naturali e la loro disponibilità reale, soprattutto a lungo termine, ha portato all’affermazione del concetto di SVILUPPO SOSTENIBILE.

Nel suo rapporto del 1987 la Brundtland-Commission of the United Nations (Commissione Mondiale per l’Ambiente e lo Sviluppo) ha definito sviluppo sostenibile: *“soddisfare i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni”*.

La prima grande manifestazione della diffusione di tale concetto avvenne durante la Conferenza delle Nazioni Unite sull’Ambiente lo Sviluppo (Earth Summit) nel 1992. Da allora, governi e organizzazioni a livelli nazionali, regionali e locali hanno tenuto in considerazione il concetto di sostenibilità nelle loro politiche e programmi e hanno fatto passi avanti per

implementare il concetto nella loro pratica. Negli ultimi anni è stato sottolineato come, affinché uno sviluppo sostenibile possa realizzarsi, sia necessario bilanciare accuratamente le richieste economiche, sociali e ambientali: questo concetto è ciò a cui spesso ci si riferisce con “i tre pilastri della sostenibilità”.

La Figura 1. 1 illustra graficamente questo concetto.

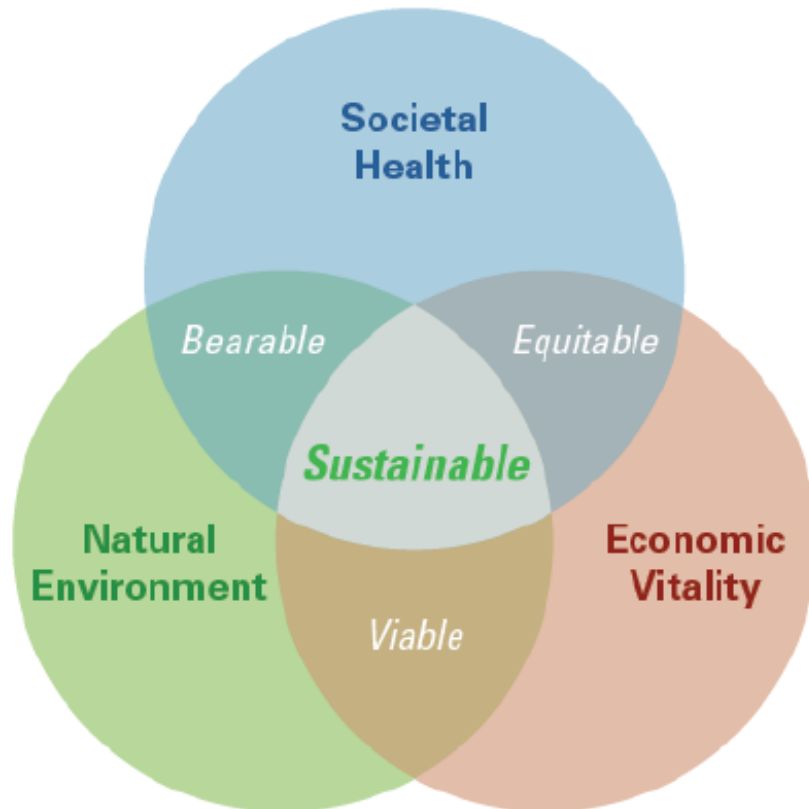


Figura 1. 1: Rappresentazione grafica dei "tre pilastri della sostenibilità"

Cercare soluzioni per uno sviluppo economico e sociale sostenibile significa tentare di coniugare il bisogno crescente e generalizzato di ricchezza e qualità della vita, con una dotazione necessaria e sufficiente di risorse, capaci di supportare un tale livello di sviluppo.

Il rapporto tra sviluppo sostenibile ed economia è evidente; parlando di sviluppo ci si riferisce in primo luogo a un processo di produzione di valore. È la sostenibilità ad introdurre alcuni elementi nuovi. Il primo è quello che impone di quantificare la produzione di valore mettendo nel conto anche gli eventuali impatti di degrado che le attività umane

possono determinare sugli ecosistemi. La produzione di valore sostenibile si basa infatti sul riconoscimento degli ecosistemi naturali come fattori imprescindibili dello sviluppo e quindi suscettibili di valutazione economica. Il grado di innovazione tecnologica che caratterizzerà il prossimo futuro influenzerà l'incremento e il recupero di efficienza delle attività umane nello sfruttamento degli ecosistemi. La sostituzione di risorse e materie prime naturali con sottoprodotti derivanti da processi di produzione e di consumo dipende da soluzioni tecnologicamente innovative. Investimenti in ricerca e sviluppo possono costituire la base per costruire una nuova autonomia delle attività umane dagli ecosistemi naturali, in una prospettiva che non sancisce un dominio distruttivo dell'uomo sulla natura, ma che ne consente lo sviluppo preservando per quanto possibile l'ambiente attraverso un più razionale impiego di risorse naturali, il cui potenziale deve essere massimizzato nei cicli produttivi in cui concorrono. Esse devono rimanere nel tempo in quantità e qualità adeguate per poter supportare la crescita; affinché questo accada si dovranno rispettare le seguenti condizioni:

- a) i consumi di risorse rinnovabili non devono superare i relativi tassi di rigenerazione;
- b) i consumi di risorse non rinnovabili non devono superare la velocità di ritrovamento o di sviluppo di risorse sostitutive (possibilmente rinnovabili);
- c) le emissioni di inquinanti non devono superare la capacità di recupero dell'ambiente.

Sostenibilità è un concetto sistemico, che si relaziona alla coesistenza dei fattori economici, sociali, istituzionali e ambientali della società umana. È concepito come un mezzo di configurazione per la civilizzazione e l'attività umana affinché la società, i suoi membri e le sue economie siano capaci di incontrare i propri bisogni ed esprimere il loro più grande potenziale nel presente, preservando allo stesso tempo la biodiversità e gli

ecosistemi naturali, e pianificando e agendo per l'abilità di mantenere questi ideali nel lungo termine.

La sostenibilità ha influenza a ogni livello di organizzazione, dal vicinato locale all'intero pianeta. I governi, le imprese e i cittadini devono partecipare attivamente a questo modo di agire, modificando il proprio stile di vita e predisponendo tutta una serie di strumenti e misure (es. normative, incentivi, regolamentazioni) che vadano di pari passo con il progresso tecnico e tecnologico.

Per misurare la sostenibilità dello sviluppo e valutare se le politiche adottate portino al raggiungimento di questo obiettivo, bisogna conoscere lo stato di partenza e ricercare possibili *indicatori di sostenibilità* che semplifichino e quantifichino la realtà.

Secondo l'*International Institute for Sustainable Development*, questi indicatori devono essere selezionati sulla base dei seguenti criteri:

1. significatività ai fini della valutazione della sostenibilità ¹;
2. rilevanza per la realtà in esame ²;
3. misurabilità e convenienza ³;
4. comprensibilità ⁴;
5. sensibilità ⁵;
6. coerenza ⁶;

1 Devono permettere il monitoraggio del processo di sviluppo sostenibile, anche a lungo termine rispetto agli obiettivi considerati, cioè, devono fornire la dimostrazione che gli obiettivi sono o non sono stati raggiunti, a fronte di valori di riferimento o di target numerici.

2 Devono essere rilevati per il contesto spaziale cui si riferiscono, evidenziando i diversi aspetti e le problematiche connesse alla sostenibilità o all'insostenibilità.

3 Devono basarsi su informazioni facilmente reperibili e rilevabili in modo da poter essere frequentemente aggiornati.

4 Devono essere semplici, chiari, non ambigui, in modo da poter essere compresi anche da non esperti.

5 Devono modificarsi in seguito al cambiamento delle condizioni sociali, economiche e ambientali, in modo da evidenziare la tendenza in atto, mostrando l'andamento temporale.

6 Devono essere coerenti con gli altri indicatori facenti parte del set specifico.

7. capacità di sintesi ⁷;
8. affidabilità ⁸;
9. disaggregabilità ⁹;

Gli indicatori sono quindi strumenti di misurazione che descrivono sinteticamente fenomeni anche molto complessi.

7 Devono essere in grado di sintetizzare in un valore numerico una grande quantità di informazioni.

8 Misure ripetute dello stesso fenomeno devono portare a conclusioni simili.

9 Devono essere disaggregabili per realtà territoriali minori, inserite nel contesto territoriale preso in esame, in modo da evidenziare le differenze esistenti.

1.1.2 SOSTENIBILITÀ NEL CONTESTO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

Per l'ingegnere di infrastrutture stradali, la considerazione della sostenibilità e di pratiche sostenibili sovente porta a concentrarsi su una molteplicità di aspetti quali il design strutturale, i materiali della pavimentazione, il processo costruttivo stesso, tutti sotto il diretto controllo dell'ingegnere. Temi come il riciclaggio, uso di scarti/sottoprodotti industriali (fly ash, cemento di risulta, etc.), conservazione delle risorse, inquinamento da CO₂ e anche energia associata tendono ad acquisire un notevole interesse in tale contesto. Sussiste così la necessità di caratterizzare e quantificare ogni aspetto di un'infrastruttura stradale, dalla sua concezione e design, alla costruzione, al suo esercizio in opera e manutenzione, fino al raggiungimento della vita utile, in termini di sostenibilità. Il miglior modo di determinare la sostenibilità di una scelta infrastrutturale sarebbe quello di impiegare una metodologia che misuri e compari i fattori economici, ambientali e sociali influenzati dalla pavimentazione durante tutto il suo ciclo vitale. Tale metodologia potrebbe essere usata in diversi modi:

- Analizzare la pratica corrente e valutare i miglioramenti quando vengono introdotti;
- Comparare diversi sistemi e soluzioni su base di giudizio oggettiva;
- Valutare i benefici relativi di approcci alternativi al design, selezione dei materiali, etc.

Comunque, una metodologia di valutazione comprensiva sino a tal punto non è ancora pronta per essere implementata. Sebbene i fattori economici siano stati identificati e possano essere misurati, un insieme di fattori ambientali sociali appropriati non è ancora stato identificato o generalmente accettato dall'industria, e corrispondenti strumenti di misura non sono generalmente disponibili.

Fattori Economici Legati alla Sostenibilità

Per ogni progetto o sistema la buona pratica ingegneristica bilancia il bisogno di minimizzare costi economici con la necessità di massimizzare efficienza, qualità, e longevità.

Comunque, se i tentativi di minimizzare i costi economici si concentrano solamente sui costi iniziali, gli ingegneri perdono l'opportunità di prendere decisioni fondate che influenzino le generazioni future e la sostenibilità a lungo termine della pavimentazione.

Detto ciò, i costi economici dovrebbero essere analizzati nei riguardi dell'intero ciclo vitale di un sistema adottando un metodo *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). Un tale metodo è basato su criteri economici che considerano il valore temporale del denaro, i costi iniziali e quelli futuri previsti, il valore ultimo alla fine del periodo di servizio. La maggior parte degli approcci LCCA utilizzati dalle società appaltatrici include solamente i costi sostenuti dalle stesse, come i costi di costruzione iniziale, preservazione, riabilitazione, il valore residuo. È possibile e forse auspicabile includere i costi dell'utilizzatore: questi costi includono, per esempio, i costi finanziari di chi transita causati dalla preservazione della strada e dalle attività manutentive. Altri costi economici che possono essere considerati includono i costi finanziari di una tutela ambientale, se si prevede un significativo impatto sull'ambiente.

Fattori Ambientali legati alla Sostenibilità

Al centro di un'analisi dell'opera con un approccio "inizio-fine" o "end-to-end" c'è l'idea di *Life Cycle Assessment* (LCA). L' LCA è scaturito dall'esigenza di tenere cumulativamente conto dell'utilizzo delle risorse e della loro disponibilità, ancora quando negli anni '60 non era pressante il tema delle risorse energetiche e della preservazione delle risorse.

L’LCA costituisce quindi un passo successivo che ora è in atto, all’interno dello stesso percorso di sviluppo che portò, nel campo economico, all’introduzione del LCCA (Life Cycle Cost Analysis).

L’obiettivo di questo approccio è di assicurare che tutti gli effetti/fattori/carichi etc. siano tenuti in conto nell’analisi, dal momento in cui ogni componente dell’oggetto di studio (la pavimentazione in questo caso) è estratto o processato, lungo tutto il suo percorso, fino all’esaurimento della sua utilità in coincidenza del raggiungimento della vita utile dell’opera. Ciò comporta essenzialmente l’analisi cumulativa dell’impatto ambientale e della sostenibilità di un prodotto attraverso tutti gli stadi del ciclo vitale dello stesso, includendo implicazioni che non sono normalmente tenute in conto in analisi più tradizionali. L’uso del termine *life cycle* si riferisce appunto a tutte le maggiori attività che occorrono nel periodo di vita del prodotto, dalla sua produzione (inclusa l’acquisizione delle materie prime necessarie), uso, e manutenzione, alla sua finale dismissione (EPA, 2006).

La Figura 1. 2 illustra il concetto di LCA, includendo inputs, outputs e i limiti del sistema.

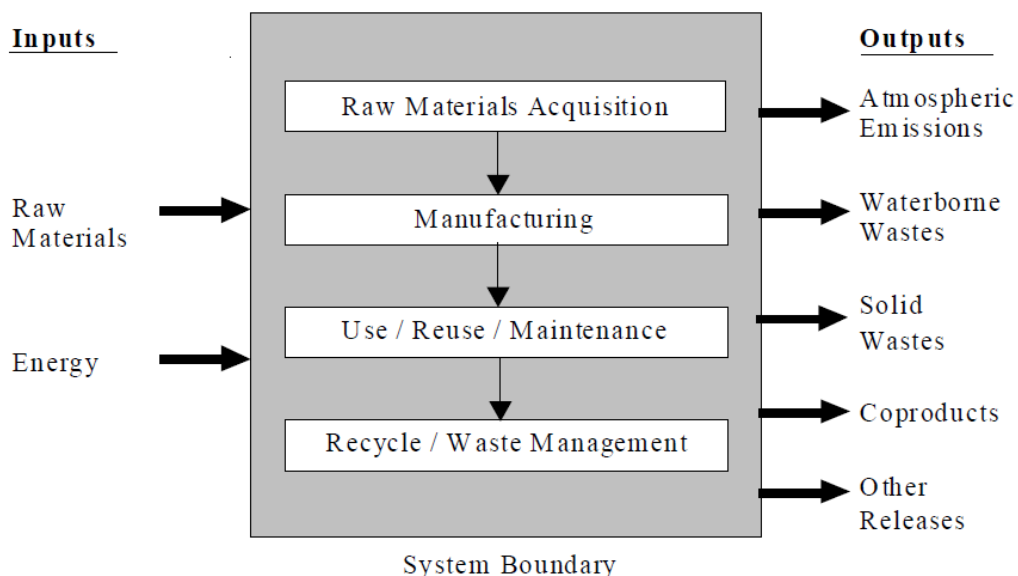


Figura 1. 2: Concetto di Life Cycle Assessment (da EPA, 2006)

Ha importanza sottolineare che questo approccio consente di focalizzare un qualsiasi numero di outputs, inclusi energia, emissioni, materie prime, potenziale nei confronti del riscaldamento globale, acqua sfruttata, materiali pericolosi. Quindi anche se la maggior parte degli approcci odierni non considera fattori come impatto del traffico durante la fase di esercizio della struttura in un'analisi di sostenibilità della stessa (dato che il movimento del veicolo non è considerato come parte della strada), l'approccio "end-to-end" dell'LCA, descritto precedentemente, evidenzia chiaramente questi risvolti.

Basandosi su questi sforzi e altri, possono essere raccomandati i seguenti parametri di valutazione dell'impatto ambientale di una generica pavimentazione stradale:

- Energia richiesta
- Emissioni / Riscaldamento globale potenziale
- Tossicità potenziale
- Consumo di materie prime
- Rifiuti generati

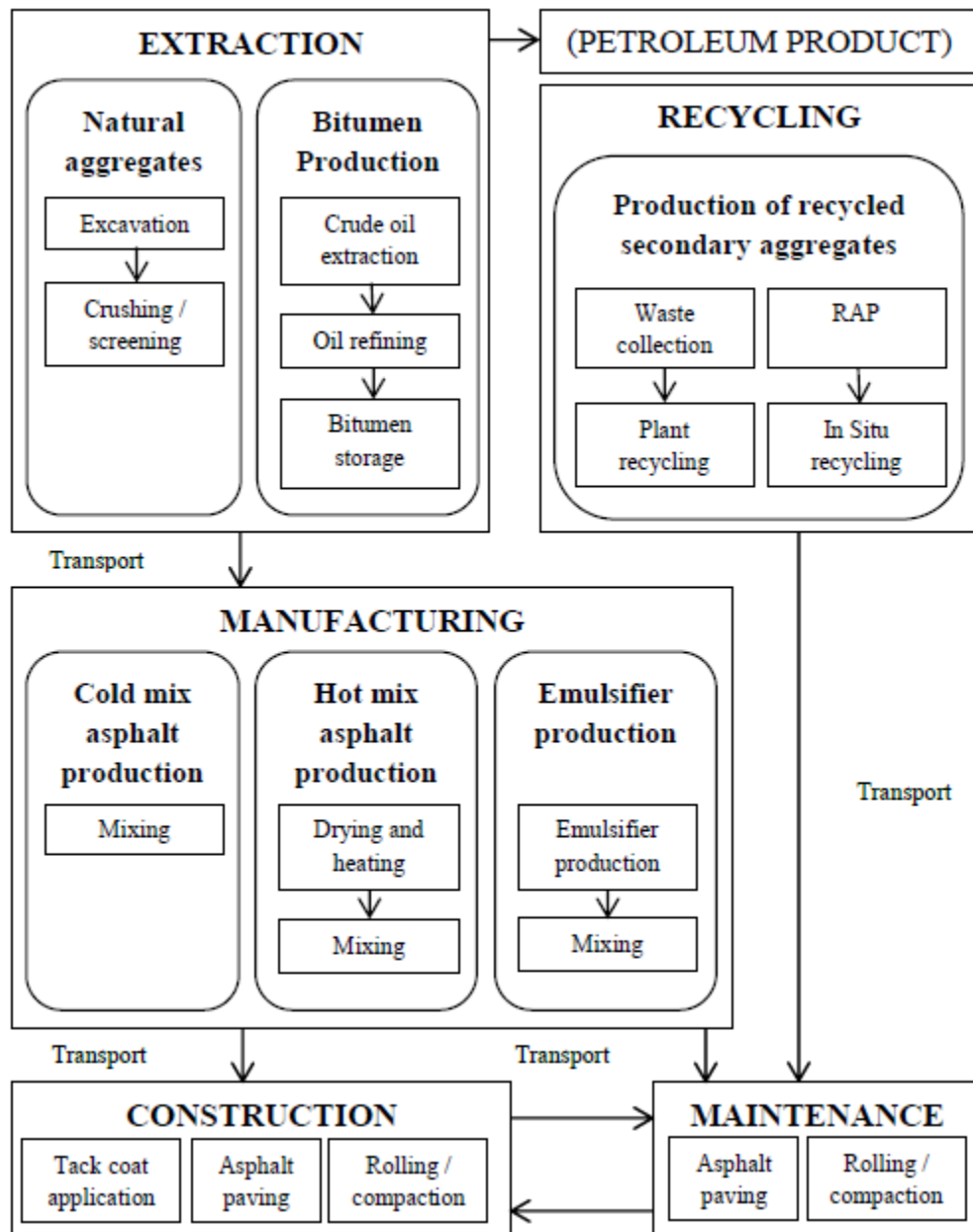


Figura 1. 3: Cinque processi principali che comprendono i limiti del sistema per le pavimentazioni di asfalto

Fattori Sociali legati alla Sostenibilità

Le società oggi giorno dipendono profondamente dall'abilità delle persone e dei beni di spostarsi rapidamente ed efficientemente da un posto all'altro. La mobilità che le strade consentono è uno dei fattori sociali critici della loro sostenibilità complessiva; un altro

fattore sociale è l'effetto delle pavimentazioni sulla qualità della vita delle comunità circostanti (livello estetico, posizionamento, contributo al rumore del traffico, impatti sulla sanità, etc.). Anche se l'industria delle pavimentazioni ha fatto progressi nello sviluppo di strumenti per analizzare due fattori di sostenibilità – LCCAs per analizzare i fattori economici e i nuovi LCAs per quelli ambientali - nessun sistema, oggettivo, è ancora disponibile per valutare i fattori sociali.

I seguenti, sono diversi potenziali parametri che potrebbero essere inclusi in una tale valutazione:

- Sicurezza
- Ritardi dell'utente
- Inquinamento acustico
- Energia associata

La Figura 1. 4 seguente riassume il sistema della sostenibilità nel campo stradale.

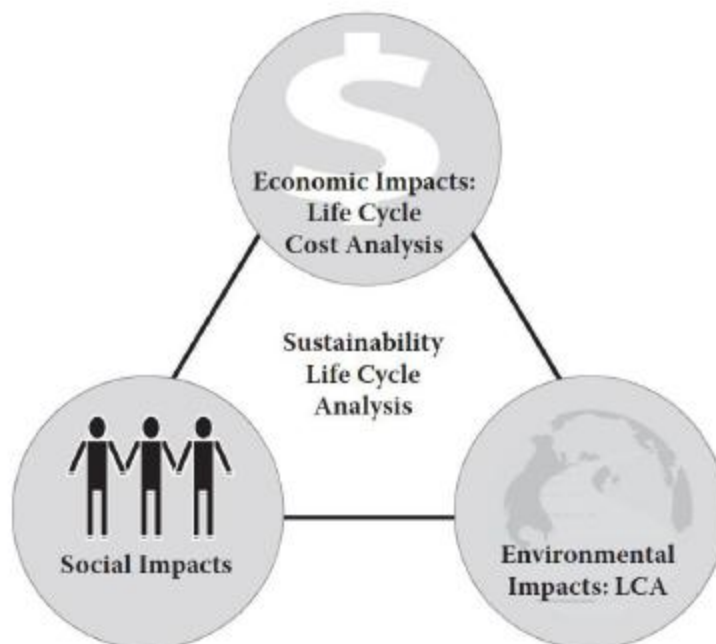


Figura 1. 4: La sostenibilità nelle pavimentazioni stradali

1.1.3 POLITICHE PUBBLICHE PER LA SOSTENIBILITÀ

La Conferenza di Rio de Janeiro del 1992 ha sancito per la prima volta la formalizzazione dello sviluppo sostenibile come obiettivo prioritario per il ventunesimo secolo e la contestuale approvazione di alcuni documenti fondamentali a supporto del processo, in particolare:

- dichiarazione sull’Ambiente e lo sviluppo;
- agenda 21;
- convenzione per la conservazione della biodiversità;
- convenzione quadro sui cambiamenti climatici;
- dichiarazione sulla gestione, conservazione e sviluppo delle foreste;

L’Agenda 21 è il documento di natura programmatica e operativa che sintetizza le strategie e le azioni specifiche che i Paesi firmatari si sono impegnati ad attuare per favorire lo sviluppo sostenibile. Il documento indica come la tutela e la valorizzazione dell’ambiente devono essere considerate in modo trasversale rispetto alle politiche sociali ed economiche, puntando quindi a integrare le dimensioni ambientale, economica e sociale. Accanto agli impegni a livello nazionale, viene data grande importanza al ruolo degli enti locali, la loro partecipazione e cooperazione sarà un fattore determinante nel perseguimento degli obiettivi.

Gli elementi fondamentali del processo di Agenda 21 locale sono: descrizione del quadro diagnostico ¹⁰, il Forum ¹¹ e il Piano di Azione Ambientale ¹².

In Italia le Agende 21 Locali rappresentano oramai un'esperienza molto diffusa, queste dovrebbero essere supportate da un nuovo auspicio, che passa dall'integrazione delle politiche degli enti di governo locale con gli obiettivi di sostenibilità. Trasporti, infrastrutture, attività produttive, agricoltura, ambiente e turismo sono alcuni tra gli ambiti principali delle politiche pubbliche che dovrebbero "concertare" obiettivi e target comuni di sviluppo durevole e sostenibile.

Uno degli strumenti più interessanti a disposizione degli enti locali è poi la contabilità ambientale, il cui obiettivo è sistematizzare le informazioni per poter disporre di dati affidabili su cui basare il processo decisionale e su cui impostare piani e programmi per tale sviluppo. La contabilità ambientale è un sistema che permette di catalogare, organizzare, gestire dati e informazioni sull'ambiente, in unità fisiche e monetarie, con il fine di rappresentare lo stato e le variazioni del patrimonio naturale, le interazioni tra economia e ambiente, le spese destinate alla prevenzione, alla protezione e al ripristino dell'ambiente.

¹⁰ Passaggio che può prevedere l'uso di strumenti diversi in relazione al target di riferimento, come ad esempio la *Relazione sullo stato dell'ambiente* che ha l'obiettivo di diffondere verso un pubblico allargato la conoscenza dello stato di salute del territorio, e la *contabilità ambientale*, che ha come destinatari i funzionari dell'ente locale per la pianificazione e la programmazione della spesa.

¹¹ È l'elemento centrale del processo di partecipazione e condivisione e dovrebbe coinvolgere i principali stakeholder territoriali e istituzionali.

¹² Coniuga capacità decisionale dell'Ente locale e formazione del consenso dei cittadini; oltre a contenere gli obiettivi generali e specifici e le azioni da intraprendere per raggiungerli, comprende anche sistemi di valutazione e pubblicazione dei risultati raggiunti.

1.2 PAVIMENTAZIONI STRADALI E LORO DETERIORAMENTO

1.2.1 I COMPONENTI DELLA PAVIMENTAZIONE

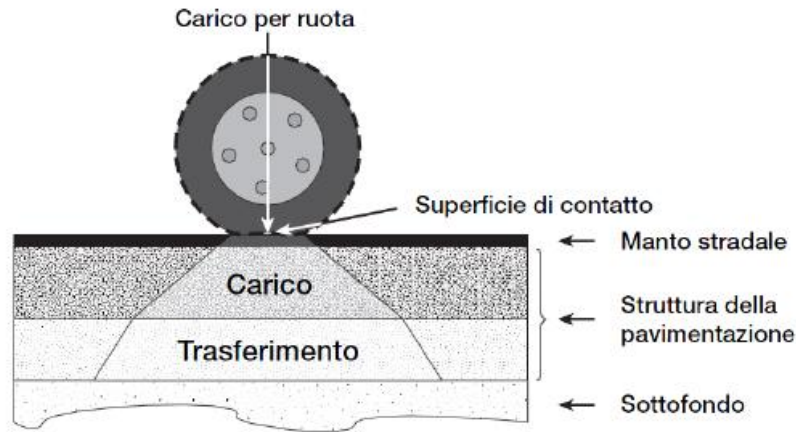


Figura 1. 5: Trasferimento del carico tramite la struttura della pavimentazione stradale

Le pavimentazioni stradali sono costituite da tre componenti principali: il manto, la struttura e il sottofondo, ognuno di essi con uno scopo ben specifico, come di seguito descritto (Figura 1. 5).

Manto della Pavimentazione

Il manto stradale, che costituisce l'interfaccia con il flusso del traffico e l'ambiente, serve a proteggere la struttura della pavimentazione da entrambi questi elementi, offrendo durata nel tempo e impermeabilità.

- **Protezione dal traffico.**

La rotazione dei pneumatici incide sul manto superficiale in due modi:

- le sollecitazioni trasmesse al manto dai carichi delle ruote sono prevalentemente sul piano verticale; tuttavia, la componente orizzontale può rivelarsi un fattore importante, in particolare nelle curve, nelle forti

pendenze e nei casi in cui l'impianto frenante subisca un danno. Il materiale impiegato per la realizzazione del manto stradale deve possedere caratteristiche di resistenza tali da consentirgli di far fronte a tutte le citate sollecitazioni senza subire rotture da compressione o deformazioni;

- l'azione di sfregamento esercitata dai pneumatici, in particolare quando si affronta una curva, tende ad abradere la superficie stradale. Col tempo, questo effetto di levigatura provoca una riduzione delle proprietà di attrito (resistenza allo slittamento) del manto che diventa scivoloso, specialmente se bagnato, e quindi pericoloso.

- Protezione dall'ambiente.

Come descritto il manto stradale è continuamente soggetto a due forme principali di attacchi da parte dell'ambiente: gli effetti termici e il «deterioramento provocato dal sole». Il manto, quindi, deve possedere le seguenti due proprietà:

- Elasticità: consente al manto di dilatarsi e contrarsi ripetutamente in base alle variazioni termiche;
- Durata: permette al manto di assorbire il quotidiano bombardamento dei raggi ultravioletti senza invecchiare precocemente.

Il bitume è uno dei materiali più frequentemente utilizzati per i manti stradali in quanto si contraddistingue per flessibilità, durata ed elevata impermeabilità. L'asfalto a caldo (con una quantità di bitume pari a ~ 5%) viene generalmente adoperato per realizzare i manti stradali di prima qualità delle strade a traffico intenso, mentre i più economici trattamenti superficiali che impiegano l'impermeabilizzante a scaglie vengono utilizzati in quei casi in cui il traffico automobilistico è ridotto.

Struttura della Pavimentazione Stradale

La struttura della pavimentazione ha il compito di trasferire il carico dal manto al sottofondo. Come si osserva nella Figura 1. 5 e nella sottostante Figura 1. 6, il carico per ruota a livello del manto viene in realtà ridotto all'interno della struttura in quanto distribuito su un'ampia area del sottofondo.



Figura 1. 6: Trasferimento del carico gravante sulla pavimentazione e tipici danni dovuti al traffico

La struttura della pavimentazione si compone sempre di vari strati di materiale aventi caratteristiche di resistenza differenti; ogni strato ha la funzione di distribuire il carico che riceve dalla parte superiore su un'area più ampia della parte sottostante. Gli strati posti nella parte superiore della struttura sono soggetti a livelli di sollecitazione maggiori rispetto agli strati inferiori e quindi devono essere costruiti con materiali più resistenti. La Tabella 1. 1 indica i tipi di materiale solitamente impiegati per la struttura della pavimentazione.

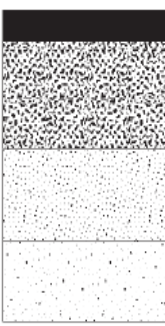
Strati tipici della pavimentazione	Ubicazione nella struttura		Realizzato con
		Manto Stradale	
	Base		Asfalto / bitume stabilizzante / Cemento stabilizzato / granulare
	Fondazione		Bitume stabilizzato / cemento stabilizzato / granulare
	Sottofondo		Cemento stabilizzato / granulare / materiale in situ

Tabella 1. 1: Strati Tipici della Pavimentazione

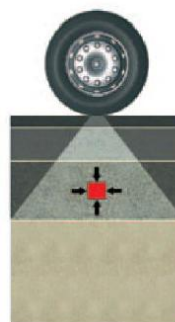
Il tipo di reazione del materiale ad un carico impartito dipende in larga misura dalle proprietà elastiche del materiale e dalle caratteristiche del carico (ampiezza, ritmo di caricamento, ecc.).

Citiamo di seguito le caratteristiche importanti (Figura 1. 7):

- I materiali granulari, che includono pietrisco e ghiaia, trasferiscono i carichi applicati attraverso i singoli granuli, o armatura, della struttura. L'attrito intergranulare conserva l'integrità strutturale ma, in caso di ripetuti caricamenti (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 provocando una deformazione della superficie. Tale deformazione si manifesta di norma sotto forma di solchi che si formano nelle aree di impronta delle ruote.
- I materiali legati, che includono i materiali stabilizzati e l'asfalto, agiscono 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 una sollecitazione di trazione nella metà inferiore, con sollecitazioni massime nelle parti alte e in quelle basse. La deformazione provocata da queste sollecitazioni, in modo 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 incrinature che si formano nella parte inferiore dello strato e che tendono a propagarsi verticalmente man mano che le ripetizioni del carico proseguono.



Materiali Legati: Flessione



Materiali Granulari: carico-dipendente

Figura 1. 7: Comportamento Sotto Carico Veicolare di Materiali Legati e Granulari

Le deformazioni che si creano nel materiale naturale e le incrinature da fatica tipiche del materiale legato sono entrambe correlate al numero di ripetizioni del carico. Questo consente di determinare la vita funzionale di una pavimentazione in termini di numero di volte che questa può essere «caricata» prima di essere soggetta al cedimento; stiamo parlando di quella che viene denominata «Capacità Strutturale» della pavimentazione.

Sottofondo della Pavimentazione

Il terreno naturale d'impianto della struttura della pavimentazione può essere sia materiale in situ (sterro) o «importato» (riporto). Le caratteristiche di resistenza di questo materiale determinano il tipo di struttura della pavimentazione in grado di distribuire il carico impartito alla superficie in modo tale che questo venga sorretto senza provocare deformazioni permanenti. I metodi di progettazione delle pavimentazioni stradali utilizzano generalmente, quale input, la resistenza e la rigidità del sottofondo e mirano a realizzare una struttura avente una resistenza tale da proteggere il sottofondo. Il metodo empirico di progettazione basato sull'Indice di Portanza Californiano (CBR = California Bearing Ratio) è uno dei più vecchi sistemi di progettazione delle pavimentazioni stradali per il quale basta l'indice CBR per stabilire i requisiti della pavimentazione. In generale, strutture della pavimentazione ad elevato spessore sono necessarie per proteggere il sottofondo di qualità inferiore e tale spessore viene di frequente ottenuto aggiungendo degli strati di «sottofondo selezionato».

1.2.2 DETERIORAMENTO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

Le pavimentazioni stradali si logorano per diverse ragioni; le due cause più importanti sono rappresentate dagli effetti ambientali e dal carico del traffico. Il deterioramento viene normalmente misurato in modo indiretto mediante la valutazione della transitabilità senza però tralasciare aspetti visibili quali la profondità del solco e la fessurazione del manto. La Figura 1. 8 mostra come queste tre caratteristiche siano tipicamente correlate al trascorrere del tempo e all'effetto cumulativo del carico del traffico.

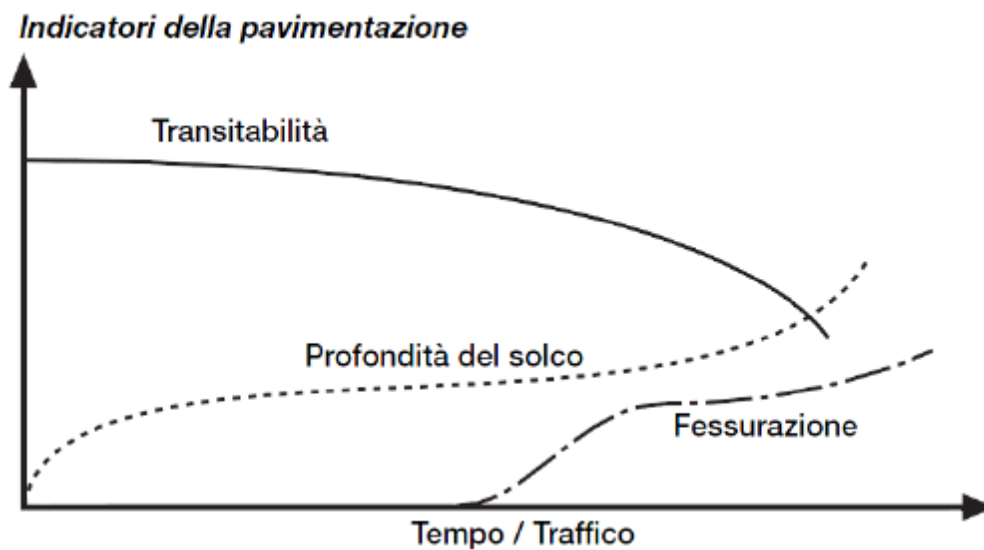


Figura 1. 8: Indicatori della Pavimentazione

Il graduale deterioramento delle pavimentazioni è provocato da:

Fattori ambientali, responsabili della maggior parte delle fessure che si formano sul manto. La principale causa di questo fenomeno sono i raggi ultravioletti del sole che provocano, in modo continuo, un lento indurimento del bitume; questo a sua volta causa una riduzione dell'elasticità che determina la formazione di fessure nel momento in cui il manto si contrae in seguito al raffreddamento. Una volta che il manto ha perso la propria capacità strutturale a causa delle suddette fessure, la pavimentazione tende a deteriorarsi ad un ritmo sempre crescente per effetto della penetrazione di acqua.

Gli effetti del carico impartito dal traffico, responsabili dello sviluppo di solchi e di incrinature che si formano all'interno della struttura della pavimentazione. Ogni veicolo in transito provoca una lieve deformazione temporanea alla struttura della pavimentazione. La deformazione indotta da un veicolo leggero è talmente piccola da essere irrilevante mentre i veicoli ad elevato carico provocano deformazioni relativamente ampie. Il passaggio di numerosi automezzi ha un effetto cumulativo che genera gradualmente deformazioni permanenti e/o incrinature da fatica. Assali sovraccaricati causano un numero sproporzionato di danni alla struttura della pavimentazione, accelerando così il fenomeno di deterioramento.

Quest'ultimo è causato da due diversi meccanismi che agiscono all'interno della struttura della pavimentazione, vale a dire:

- Una deformazione permanente provocata dall'addensamento, ove le ripetute sollecitazioni di carico fanno sì che i singoli granuli all'interno dello strato della pavimentazione si avvicinino, causando una riduzione del numero di vuoti. Nel materiale granulare, questa perdita di vuoti comporta un aumento della resistenza (quanto più un materiale è denso e tanto più questo è resistente) ma, nel caso dell'asfalto, si verifica l'esatto contrario. Una riduzione della quantità di vuoti nell'asfalto non solo provoca solchi nelle aree di impronta ma fa sì che il bitume inizi ad agire come un fluido per cui i carichi delle ruote generano pressioni idrauliche. Questo fenomeno provoca una spinta lungo i bordi della carreggiata;

- Incrinature da fatica dei materiali legati. Queste si sviluppano nella parte inferiore dello strato ove la deformazione da trazione provocata dai carichi delle ruote è al suo massimo livello. Dette incrinature si propagano poi alla superficie. Le deformazioni permanenti del materiale sottostante aggravano questa condizione aumentando di fatto l'entità della deformazione da trazione esercitata dai carichi delle ruote. Una volta che

l'incrinatura si insinua attraverso il manto protettivo, l'acqua penetra nella struttura sottostante della pavimentazione. Come descritto in precedenza, l'effetto di ammorbidimento dell'acqua comporta una riduzione della resistenza che a sua volta provoca un aumento del grado di deterioramento in caso di ripetuti carichi per ruota.

Inoltre, l'acqua in un materiale saturo trasmette prevalentemente carichi ruota verticali sotto forma di pressioni che erodono rapidamente la struttura del materiale granulare e provocano la separazione del bitume dall'aggregato di asfalto. In queste condizioni le frazioni fini del materiale della pavimentazione vengono espulse verso l'altro attraverso le incrinature (noto come «effetto pompa»), la qual cosa comporta lo sviluppo di vuoti di ampie dimensioni all'interno della pavimentazione. La formazione di buche e il rapido deterioramento della pavimentazione sono l'immediata conseguenza del logorio della sede stradale. La Figura 1. 9 indica tre delle più comuni forme di deterioramento della pavimentazione.

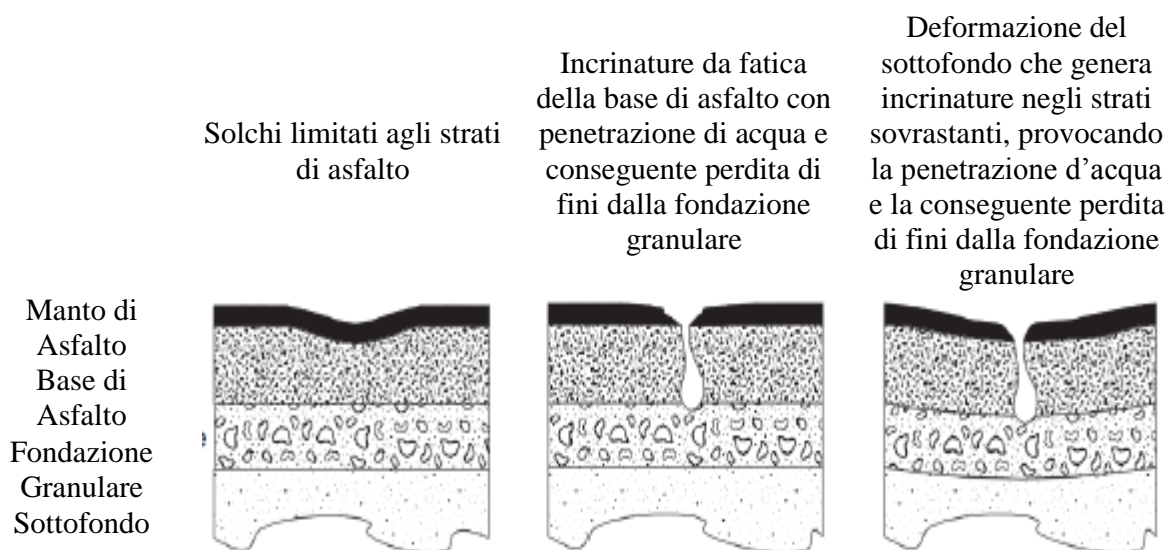


Figura 1. 9: Forme di Deterioramento della Pavimentazione Stradale

In quei casi in cui le temperature scendono al di sotto di 4°C, l'eventuale acqua, presente nella pavimentazione, si espande creando pressioni idrauliche, persino in assenza dei carichi delle ruote. La deformazione da gelo causata da ripetuti cicli gelo/disgelo

rappresentano l'aspetto più grave per una pavimentazione caratterizzata da fessure; ne consegue infatti il disfacimento. Nelle aree desertiche secche, le fessure del manto stradale provocano un altro tipo di problema. Di notte, quando le temperature sono relativamente basse (spesso sotto zero) il manto stradale si contrae aumentando le dimensioni delle fessure e comportandosi come un rifugio per la sabbia battuta dal vento. Durante il giorno, quando le temperature salgono, la superficie non riesce ad espandersi a causa della sabbia intrappolata all'interno della fessura, il che fa sì che grosse forze orizzontali provochino una rottura ai lati della fessura. Queste forze possono poi portare ad un innalzamento del manto rispetto alla struttura della pavimentazione in prossimità delle fessure influenzando sulla qualità, decisamente scadente, della transitabilità. Un'ulteriore causa della fessurazione superficiale, in modo particolare dei manti sottili di asfalto, è legata alla mancanza di traffico. L'azione di «impastamento» del traffico mantiene «vivo» il bitume. L'ossidazione e il conseguente indurimento di tale materiale provoca la formazione di fessure termiche a livello della superficie bitumata. La continua esposizione a sollecitazioni del bitume provoca una tensione tale da chiudere queste fessure non appena si formano, evitandone così la propagazione.

1.2.3 MANUTENZIONE E RISANAMENTO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

Gli interventi di manutenzione della pavimentazione solitamente hanno come obiettivo quello di evitare l'infiltrazione d'acqua negli strati più profondi. A tale scopo, è necessario garantire l'impermeabilizzazione del manto nel tempo e realizzare e mantenere efficaci le opere di drenaggio al fine di impedire che l'acqua non si depositi lungo il ciglio stradale.

L'acqua penetra normalmente nella struttura superiore della pavimentazione attraverso le fessure del manto stradale su cui spesso si deposita. Le fessure, quindi, devono essere sigillate non appena compaiono e i margini della strada devono essere rifilati per consentire lo scolo dell'acqua. Se affrontati con un certo anticipo, gli effetti dell'invecchiamento possono essere trattati efficacemente mediante la nebulizzazione di emulsione bituminosa. In caso di condizioni più gravi occorre applicare un impermeabilizzante a scaglette, qualora il volume del traffico sia ridotto, oppure un sottile rivestimento tradizionale di asfalto miscelato a caldo. I suddetti provvedimenti, che mirano a conservare la flessibilità e la durata del manto stradale, risolvono in effetti soltanto il deterioramento dovuto alle condizioni ambientali.

Le deformazioni e le incrinature da fatica causate dal carico del traffico non possono essere trattate in modo efficace mediante interventi superficiali di manutenzione; esse richiedono infatti interventi di risanamento.

L'usura della pavimentazione, solitamente, è un processo relativamente lento. Gli indicatori di deterioramento della pavimentazione di cui al paragrafo precedente possono essere utilizzati per monitorare il ritmo del deterioramento. Gli enti competenti impiegano spesso un sistema di database, noto come Sistema di Gestione della Pavimentazione (PMS = Pavement Management System) per controllare continuamente la transitabilità di tutte le

pavimentazioni stradali della loro rete viaria, concentrandosi su quelle che richiedono maggiore attenzione.

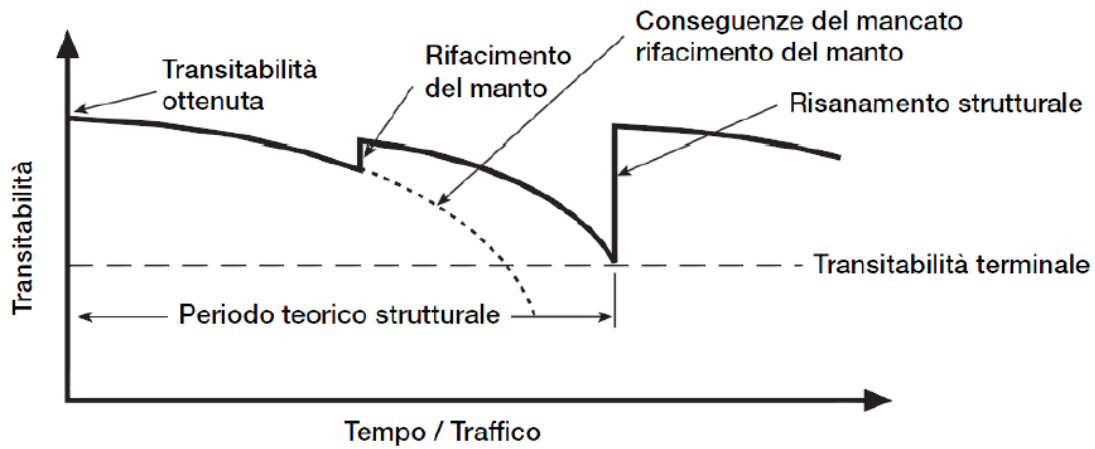


Figura 1. 10: Pianificazione della Manutenzione e Riabilitazione mediante il Monitoraggio delle Condizioni di Guida

La Figura 1. 10 riporta un grafico di PMS che mostra l'efficacia di interventi di manutenzione e di risanamento atti a mantenere alti livelli di transitabilità dell'opera o quantomeno accettabili. Essi sono infatti indice del tasso di deterioramento della sovrastruttura: peggiori livelli delle condizioni d'uso della strada, comportano maggiore rapidità di deterioramento. Al peggiorare delle condizioni, crescono l'entità e i costi degli interventi di ripristino.

Nella figura sopra riportata, viene sottolineata l'importanza di agire in modo tempestivo allo scopo di garantire le migliori condizioni possibili di transitabilità.

Il ritmo di deterioramento come detto, è un fattore legato alla transitabilità; peggiore è la transitabilità e più rapido sarà il ritmo di deterioramento. Man mano che la qualità della transitabilità si riduce, occorreranno rimedi di più ampia portata con un conseguente aumento dei costi. La decisione circa il tipo di intervento a cui ricorrere per migliorare la pavimentazione stradale o semplicemente per garantirne le condizioni iniziali di transitabilità è spesso dettata da considerazioni di natura economica, con vincoli legati al budget. Provvedimenti di conservazione a breve termine possono essere estremamente

redditizi. Il ripristino della pavimentazione viene talvolta differito fino a quando non potrà essere associato ad interventi volti a migliorare la geometria stradale.

Ogni decisione relativa a procedure di risanamento va comunque presa, nell'ambito del contesto dell'intera rete viaria. Del resto, non fare alcunché e lasciare che la pavimentazione si deteriori ulteriormente è generalmente la decisione peggiore a causa del tasso esponenziale del grado di deterioramento col trascorrere del tempo.

1.3 RIFIUTI DI DEMOLIZIONE E RICOSTRUZIONE (C&D)

A fianco del problema relativo ai rifiuti solidi urbani, noto a tutti, negli ultimi vent'anni ha acquisito sempre maggiore importanza anche quello riguardante lo smaltimento di rifiuti quali terre e rocce di scavo, materiale derivante dalla costruzione e demolizione di edifici e sovrastrutture stradali, rientranti nella categoria dei rifiuti speciali e che, previo idoneo trattamento, possono essere recuperati e riutilizzati per la costruzione di nuove strade, di ferrovie o come inerti nei calcestruzzi. Lo smaltimento dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) costituisce una determinante negativa dal punto di vista ambientale (occupazione di suolo, possibile inquinamento, spreco di energia e di materia "incorporata" nei rifiuti). Il loro reimpiego quali materiali da costruzione può quindi produrre un impatto ambientale positivo, cui si aggiunge la riduzione di effetti negativi sull'ambiente conseguenti alla corrispondente limitazione del prelievo di inerti naturali, con un bilancio complessivo di un'azione di recupero e riciclaggio potenzialmente molto favorevole, considerate le consistenti quantità in gioco, analizzate nei paragrafi successivi.

1.3.1 EUROPA

1.3.1.1 PRODUZIONE DI RIFIUTI C&D

I rifiuti da C&D costituiscono una quota percentuale rilevante della produzione totale di rifiuti in tutti i paesi della Unione Europea; dalle più recenti stime (EU as a Recycling Society Present recycling levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the EU, 2009) emerge che i rifiuti da C&D rappresentano circa il 31% in peso di tutti i rifiuti prodotti in Europa, attestandosi ad una produzione annua pari a 850.000 t. In Figura 1. 11 è riportata l'evoluzione temporale di tale produzione per abitante, relativamente a diversi paesi dell'unione europea a partire dal 1995 sino alle più recenti stime disponibili.

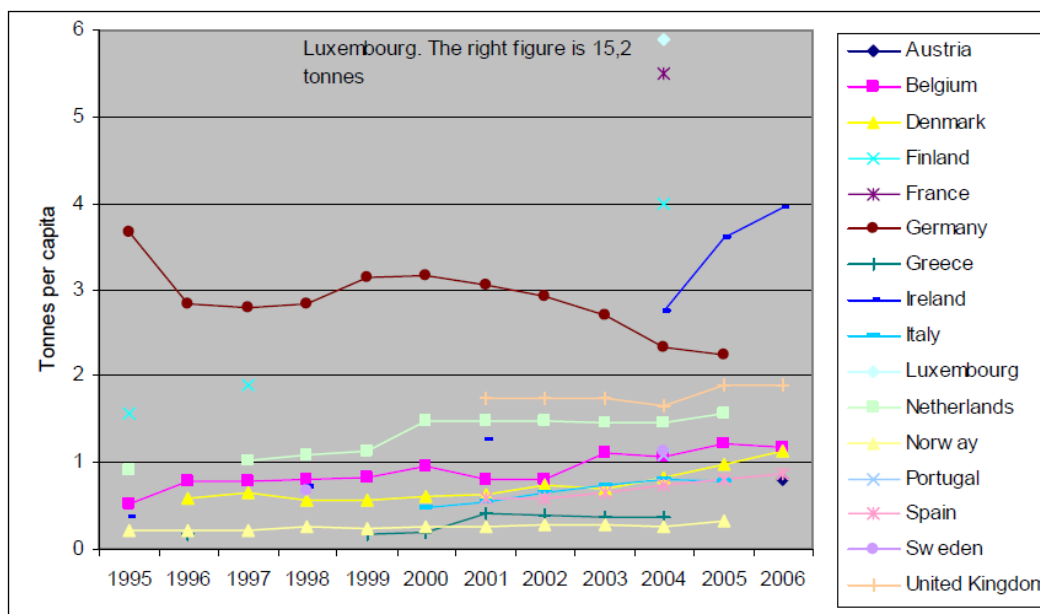


Figura 1. 11: Produzione di Rifiuti C&D per Abitante di alcuni Paesi Europei (Fonte: Eurostat e ETC/RWM, 2008)

La produzione per abitante negli Stati membri e in Norvegia ha una grande variabilità: Francia e Lussemburgo generano 7 e 15 tonnellate per abitante per anno, rispettivamente, Germania e Irlanda si collocano tra 2 e 4 t/ab/a, mentre il resto dei paesi

sono nella fascia tra 0,2 (Norvegia) e 2 (Inghilterra). L'Italia si attesta a quota 0,8 t/ab/a. Tutti paesi in cui i dati sono disponibili per più di un anno, esclusa la Germania, hanno visto un incremento di rifiuti da C&D nel periodo dal 1995 al 2006.

Per quanto riguarda la loro composizione, essa risulta molto variabile, sia per la diversa origine, sia in funzione di fattori quali le tipologie e le tecniche costruttive locali, il clima, l'attività economica e lo sviluppo tecnologico del territorio, la disponibilità locale di materie prime e materiali da costruzione. Le componenti tipiche dei rifiuti da costruzione e demolizione sono: terreno materiale roccioso, ghiaia e materiale da riempimento, calcestruzzo, conglomerati bituminosi, mattoni piastrelle e tegole, legno, intonaco e altre finiture interne, plastiche, metalli, vetro ed alcuni altri rifiuti vari come carta, cartoni, contenitori, etc. La Figura 1. 12 riporta la composizione percentuale relativa dei vari costituenti dei rifiuti C&D per alcuni paesi europei, vecchi e nuovi, secondo orizzonti temporali variabili dal 2000 al 2006. L'Italia, stante la scarsa, frammentata e disomogenea raccolta di dati necessari all'elaborazione di statistiche e indici specifici del settore delle costruzioni e demolizioni, non dispone di dati temporalmente comparabili e pertanto rimane esclusa da tale confronto.

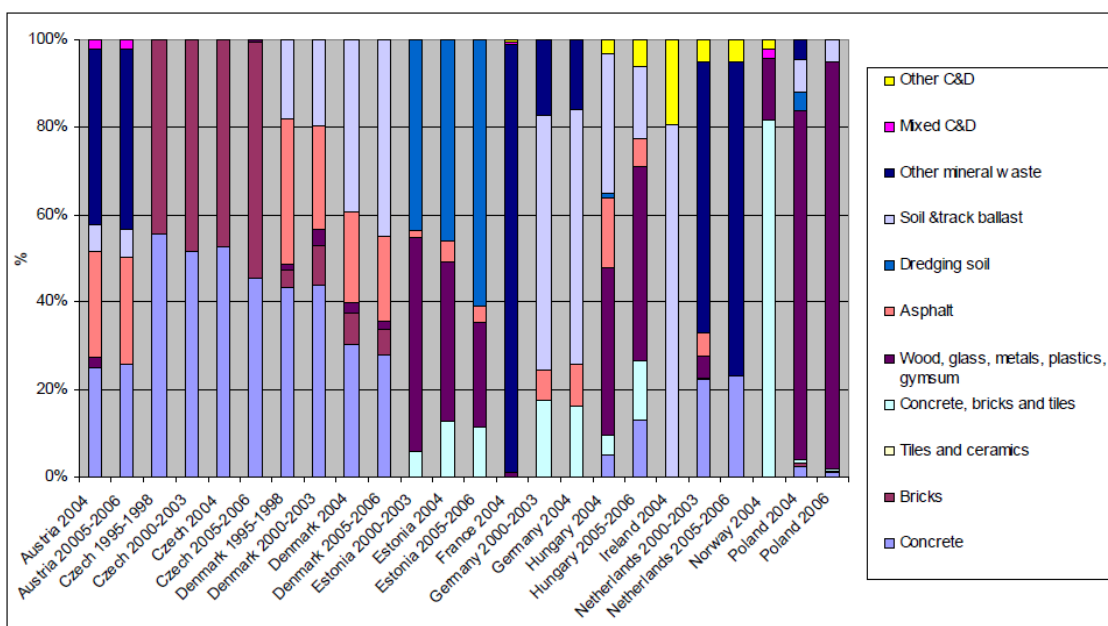


Figura 1. 12: Composizione % dei Rifiuti da C&D e sua Evoluzione Temporale nella UE e in Norvegia (Fonte: Eurostat e ETC/RWM, 2008 sulla base di rapporti e statistiche nazionali)

1.3.1.2 RECUPERO DI RIFIUTI C&D

I rifiuti da C&D possono essere suddivisi in tre categorie generali:

- la **frazione riutilizzabile**, costituita da quegli elementi che possono essere riportati alla loro forma precedente e riconvertiti direttamente alla loro funzione originale: finestre, inferriate di balconi, travi, ecc;
- la **frazione riciclabile**, costituita dagli scarti riciclabili o dai rifiuti che, sottoposti a termodistruzione, forniscono energia. Il riciclaggio del materiale concerne soprattutto la frazione litoide, ma non sono esclusi legno non trattato e metalli, mentre l'utilizzo dal punto di vista termico riguarda i componenti organici, come pavimenti in PVC o legno trattato. A differenza della frazione riutilizzabile, questa frazione non ha conservato né la forma né la funzione originarie;
- la **frazione inutilizzabile**, costituita dai componenti indesiderati presenti nel materiale da riciclare o dalle frazioni che contengono inquinanti, da conferire in discarica o trattare separatamente.

Secondo quanto previsto dalla Direttiva 2008/98/CE (art. 11, comma 2, lettera b), gli Stati membri devono adottare entro il 2020 misure necessarie per promuovere il riutilizzo, il riciclaggio di questa tipologia di rifiuti non pericolosi con obiettivi di recupero pari almeno al 70% in termini di peso. È stato possibile ottenere informazioni sul riciclo dei rifiuti da C&D soltanto per 18 dei potenziali 28 paesi trattati (EU-27 e Norvegia).

La Figura 1. 13 mostra il riciclo totale di tali rifiuti per abitante e, dove possibile, il suo sviluppo nel tempo. I paesi con un alto tasso di produzione per persona, come Francia, Germania e Irlanda, hanno un simile alto livello di riciclo, tra 2 e 3,5 t.

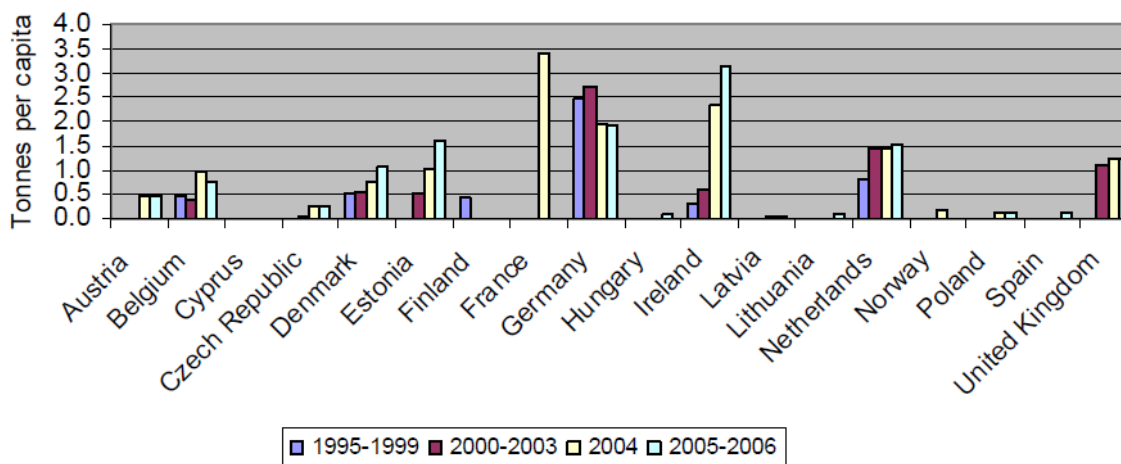


Figura 1. 13: Riciclo di rifiuti da C&D per Abitante nella UE e in Norvegia (Fonte: Eurostat e ETC/RWM, 2008 sulla base di rapporti e statistiche nazionali)

Il maggiore tasso di riciclo a persona per alcuni Stati membri sembra riflettere che i paesi con più alti quantitativi di riciclo si comportino “meglio”. Quando il riciclo, però, è rapportato alla produzione totale, questa discriminazione scompare.

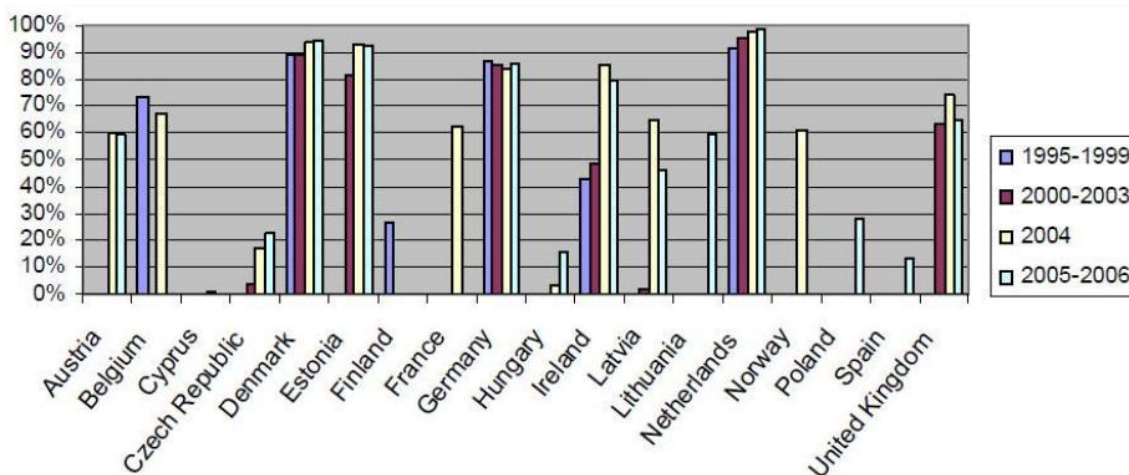


Figura 1. 14: Riciclo di Rifiuti da C&D per Abitanti, in Percentuale sul Totale Generato, nella UE e in Norvegia (Fonte: Eurostat e ETC/RWM, 2008 sulla base di rapporti e statistiche nazionali)

La Figura 1. 14 mostra che la maggior parte dei vecchi Stati membri hanno una percentuale di riciclo al di sopra del 60%. Danimarca, Germania, Irlanda e l'Olanda, ma anche l'Estonia, riciclano persino oltre l'80% dei rifiuti da C&D. Durante gli ultimi anni sembra che i tassi di riciclo siano lievemente cresciuti in paesi con già alti tassi di riciclo

come Danimarca, Germania, Olanda e Inghilterra. In Repubblica Ceca, Estonia, Ungheria e Irlanda, il livello iniziale è a basso, ma è poi cresciuto maggiormente. L'incremento delle quantità riciclate indica che le politiche nazionali ed europee volte a dirottare i rifiuti avviati alle discariche verso attività di recupero materiale stanno producendo buoni risultati. Condizioni di mercato favorevoli per alcuni materiali di rifiuto possono aver giocato un ruolo favorevole, sebbene informazioni recenti evidenzino come il mercato del riciclo sia stato negativamente colpito dall'attuale crisi economica, che ha portato a una diminuita domanda di materiali, inclusi i materiali di recupero in generale. Questo potrebbe tradursi, in futuro, in ulteriori sviluppi positivi dei livelli di riciclaggio in Europa. Per quanto attiene la composizione percentuale della frazione riciclata dei rifiuti da C&D, con un occhio di riguardo per gli asfalti, la Figura 1. 15 è indicativa della situazione di alcuni paesi europei.

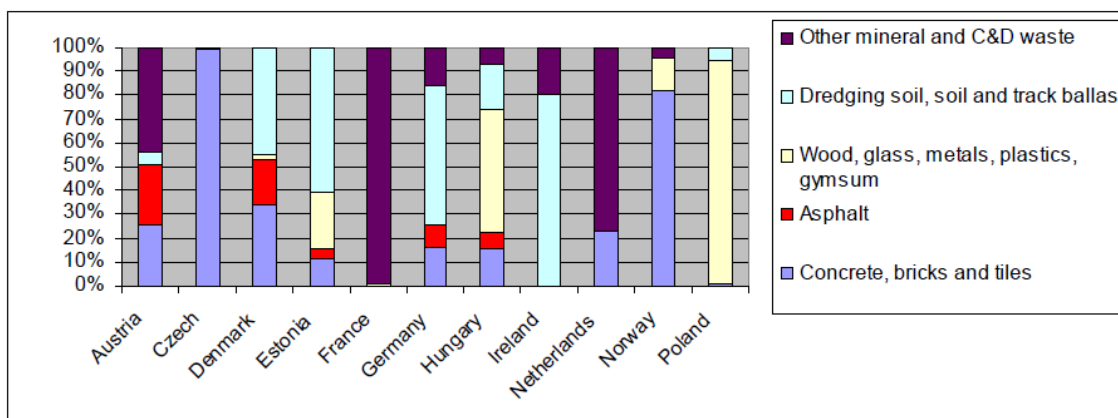


Figura 1. 15: Composizione della Frazione Riciclata dei Rifiuti C&D per alcuni Paesi Europei (Fonte: Eurostat e ETC/RWM, 2008 sulla base di rapporti e statistiche nazionali)

1.3.2 ITALIA

1.3.2.1 RIFIUTI SPECIALI E MUD

In attesa che venga reso operativo il nuovo sistema di tracciabilità dei rifiuti (SISTRI), introdotto con il Decreto ministeriale del 17 dicembre 2009 (pubblicato nella G.U. del 13 gennaio 2010 ed entrato in vigore il giorno successivo) e avente come obiettivo la totale informatizzazione della filiera dei rifiuti speciali, la banca dati MUD (Modulo Unico di Dichiarazione ambientale che tutti i soggetti che producono raccolgono, trasportano e gestiscono rifiuti sono tenuti annualmente a compilare ed inviare alle Camere di commercio ai sensi dell'art. 189 del D. Lgs. 152/2006), ha rappresentato fino ad oggi la fonte dati principale per conoscere e valutare produzione, gestione e flussi dei rifiuti speciali, di cui fanno parte i rifiuti da C&D. La produzione dei rifiuti speciali quindi, anche per il 2009, è stata quantificata utilizzando le informazioni contenute nella banca dati MUD, effettuate ai sensi dell'art. 189 del D. Lgs. 152/2006, precisando che la produzione risulta comunque sottostimata in quanto il sopra citato art.189 prevede l'esonero dall'obbligo di dichiarazione per "le imprese che raccolgono e trasportano i propri rifiuti non pericolosi, di cui all'articolo 212, comma 8, nonché, per i soli rifiuti non pericolosi, le imprese e gli enti produttori iniziali che non hanno più di dieci dipendenti". Per tale motivo i dati MUD, come ogni anno sono stati sottoposti a specifiche procedure di stima elaborate dal sistema delle agenzie ISPRA/Arpa per eliminare i principali errori (quali unità di misura, errori di inserimento dati, attendibilità del dato), tuttavia anche il dato integrato potrebbe risultare ancora parzialmente sottostimato.

1.3.2.2 PRODUZIONE TOTALE DI RIFIUTI SPECIALI

La produzione nazionale dei rifiuti speciali si attesta, nell'anno 2009, a circa 128,5 milioni di tonnellate con un calo, rispetto al valore rilevato nel 2008, pari al 7,3% circa. Il dato complessivo tiene conto sia dei quantitativi derivanti dalle elaborazioni MUD che di quelli stimati (Rapporto Rifiuti Speciali Edizione 2011, Rapporti 155/2012).

La produzione dei rifiuti speciali non pericolosi desunta dalle elaborazioni MUD risulta pari, nel 2009, a circa 52,6 milioni di tonnellate (Tabella 1. 2, Figura 1. 16). A questi vanno aggiunti circa 8,7 milioni di tonnellate relativi alle stime integrative effettuate per il settore manifatturiero e per quello sanitario e circa 56,7 milioni di tonnellate di rifiuti inerti, interamente stimati, afferenti al settore delle costruzioni e demolizioni, per una produzione totale di rifiuti speciali non pericolosi pari a circa 118,2 milioni di tonnellate (incluse 181 mila tonnellate circa di rifiuti con attività ISTAT non determinata).

Tipologia	Quantitativo annuale (t)			
	2006	2007	2008	2009
Rifiuti speciali non pericolosi esclusi i rifiuti stimati (MUD)		63.415.208	56.322.398	52.637.229
Rifiuti speciali non pericolosi esclusi i rifiuti stimati da C&D (integrazioni stime)	73.409.256	8.803.958	9.175.547	8.688.731
Rifiuti speciali non pericolosi da C&D (stime)	52.082.805	53.202.433	61.720.058	56.680.750
Rifiuti speciali non pericolosi con attività ISTAT non determinata (MUD)		48.351	65.559	180.749
Totale non pericolosi	125.492.061	125.469.950	127.283.562	118.187.459
Rifiuti speciali pericolosi (MUD)		9.794.419	10.050.409	8.689.192
Vaicoli radiati per demolizione (stime)	10.560.991	1.556.765	1.229.921	1.610.137
Rifiuti speciali pericolosi con attività ISTAT non determinata (MUD)		10.026	10.925	15.313
Totale pericolosi	10.560.991	11.361.210	11.291.255	10.314.642
Rifiuti speciali con CER non determinato (MUD)		4.508	6.992	3.461
Totale rifiuti speciali	136.053.052	136.835.668	138.581.809	128.505.562

Tabella 1. 2: Produzione Nazionale di Rifiuti Speciali, anni 2006-2009 (Fonte: ISPRA)

L'analisi dei dati per attività economica (secondo la classificazione Ateco 2002) evidenzia che il maggior contributo alla produzione complessiva dei rifiuti speciali è dato dal settore delle costruzioni e demolizioni (Codice Ateco 45) nella quota di 59.173.322 t (58.828.670 t NP MUD + Stime, 344.652 t P) su un totale di rifiuti pericolosi complessivo di

tutte le attività economiche pari a 128.505.562 t (118.187.459 t NP MUD + Stime, 10.314.642 t P), con una percentuale, nell'anno 2009, pari al 46,1% del totale prodotto.

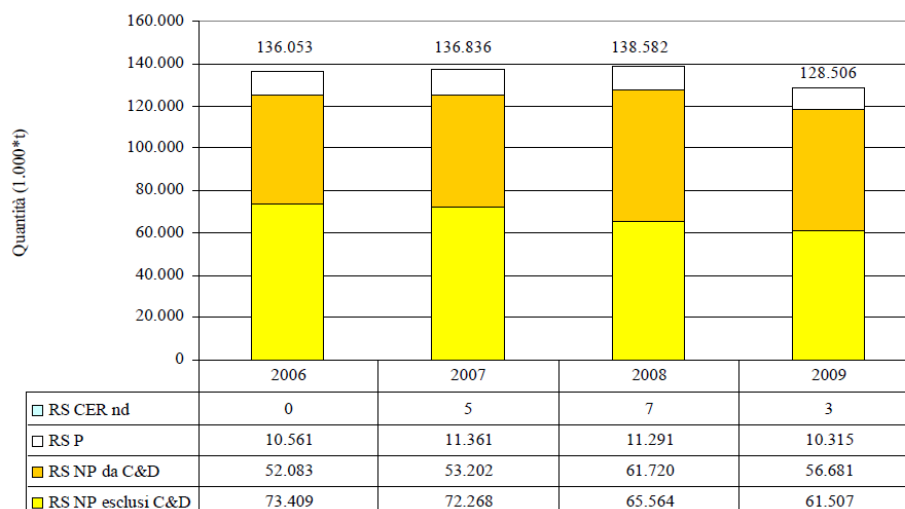


Figura 1. 16: Produzione Nazionale di Rifiuti Speciali, anni 2006-2009 (Fonte: ISPRA)

Relativamente ai soli rifiuti speciali non pericolosi la ripartizione percentuale tra le diverse attività riflette, come ipotizzabile in considerazione dell'elevata incidenza di tale tipologia di rifiuti, la distribuzione dei dati di produzione totale; i rifiuti non pericolosi rappresentano, infatti, quasi il 92% del quantitativo complessivo di rifiuti speciali annualmente prodotti, e ciò si traduce, per il settore delle costruzioni e demolizioni, in una copertura percentuale pari al 49,8% circa del totale dei RS NP (Figura 1. 17).

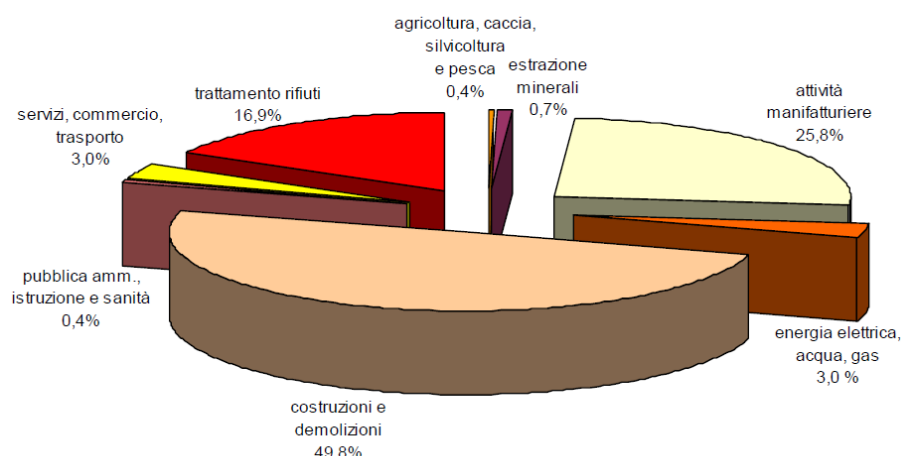


Figura 1. 17: Ripartizione Percentuale della Produzione dei Rifiuti Speciali non Pericolosi per Attività Economica, anno 2009 (Fonte: ISPRA)

Si può notare come all'interno della categoria C&D (CER 17) i rifiuti NP rappresentino la quasi totalità della produzione (Figura 1. 18).

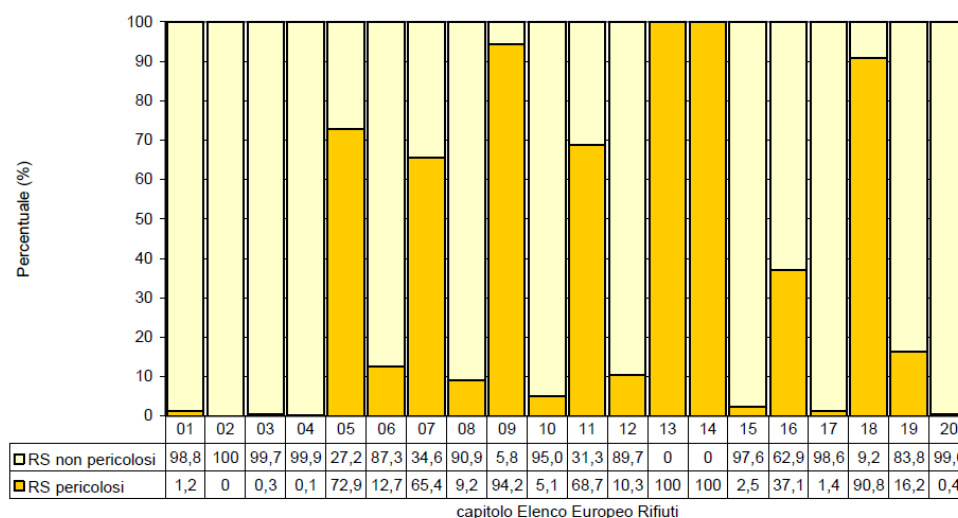


Figura 1. 18: Ripartizione Percentuale della Produzione dei RS tra Rifiuti Pericolosi e non Pericolosi per Capitolo dell'Elenco Europeo dei Rifiuti, anno 2009 (Fonte: ISPRA)

Per quanto riguarda i dati sulla produzione dei rifiuti speciali non pericolosi da costruzione e demolizione stimati da ISPRA si può rilevare una soddisfacente correlazione tra gli stessi e l'andamento del prodotto interno lordo del settore (valori a prezzi correnti, dati ISTAT).

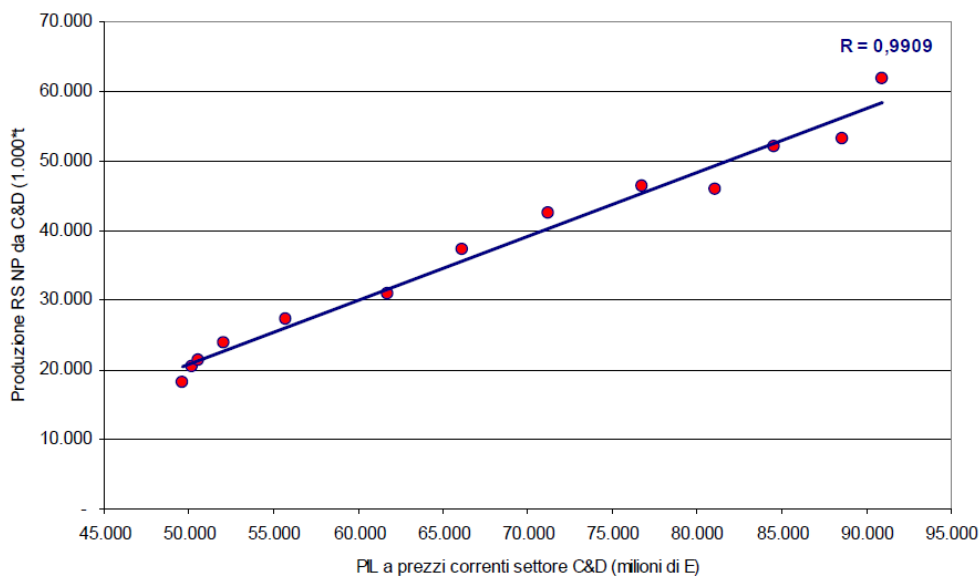


Figura 1. 19: Relazione tra Produzione di RS da C&D non Pericolosi e PIL a Valori a Prezzi Correnti (anni 1996-2009)

Infatti, come emerge dalla Figura 1. 19, mettendo in relazione i due indicatori per il periodo 1996-2009, si ottiene un valore di R pari a 0,9909, che suggerisce la sussistenza di una regressione di tipo lineare. Una buona correlazione si osserva anche tra il dato di produzione dei rifiuti e quello afferente alle unità di lavoro del settore, espresse come valori medi annui in migliaia. In tal caso si riscontra un valore di R pari a 0,9826 (Figura 1. 20).

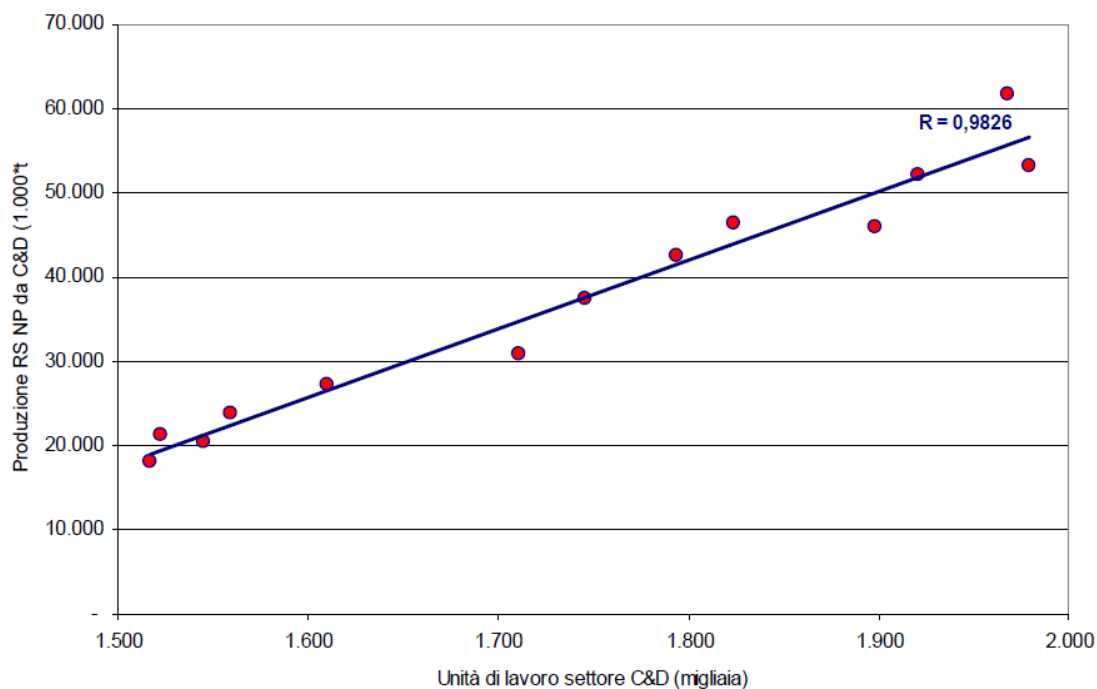


Figura 1. 20: Relazione tra Produzione dei RS da C&D non Pericolosi e Unità di Lavoro del Settore (anni 1996-2009)

1.3.2.3 COMPOSIZIONE DEI RIFIUTI DA C&D

Per quanto attiene la composizione dei rifiuti C&D, le stime sono molto incerte, oltrech  ormai datate; a titolo indicativo se ne d  comunque informazione.

Rispetto alla provenienza, da alcuni Autori [Mazza, G.D.; I rifiuti da cantiere edilizio: possibilit  di riciclaggio; in RS-Rifiuti Solidi, anno VII- numero 6, nov-dic 1993, citato in Rigamonti, Ennio; Dati quantitativi e qualitativi sulla produzione di rifiuti da C&D; in: La gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione; Istituto per l'Ambiente, Milano, 1995 (Rapporto 95/02)]   ritenuta realistica una ripartizione che attribuisce rispettivamente alle attivit  di demolizione il 90% circa del quantitativo (in peso) di rifiuti C&D prodotti, il 5÷7% alle attivit  di manutenzione e il 2÷3% alle attivit  di costruzione.

Per quanto attiene invece la natura e le caratteristiche dei rifiuti C&D - e quindi la loro composizione media - le informazioni reperibili in letteratura sono disomogenee e lacunose: i dati riferiti alla situazione di Paesi stranieri non sono direttamente confrontabili con l'Italia a causa di differenze spesso rilevanti nei materiali e nelle tecnologie di costruzione e dunque nei rifiuti prodotti.

La Tabella 1. 3 seguente, riassume le informazioni disponibili in materia di composizione media dei rifiuti C&D: di particolare rilievo sono i laterizi e calcestruzzi che costituiscono, insieme, l'80% del totale [Jacobsen, G.B.; Quantitativi, composizione e riciclaggio degli scarti di costruzione e demolizione in Europa; in: RS-Rifiuti Solidi, anno 6, n.2 , marzo 1992].

Di minore entit , ma non di importanza, sono i conglomerati bituminosi derivanti da scarifica stradale, che saranno il materiale di risulta utilizzato in questa tesi.

Categoria di Rifiuto	% in Peso sul Totale
Calcestruzzo	30.0
Calcestruzzo non armato	10.0
Calcestruzzo armato	20.0
Laterizio (tegole, mattoni, forati)	50.0
Asfalti	5.0
Scavi	6.0 – 10.0
Carta e cartone	0.6 – 4.0
Metallo	3.0
Varie	1.0 – 1.4

Tabella 1. 3: Composizione Rifiuti C&D Italiani (Fonte: Jacobsen, 1992)

Secondo le stime allora elaborate dall'European Demolition Association (EDA) invece, gli asfalti rappresenterebbero una percentuale doppia, pari al 10% (Tabella 1. 4).

Tipologia	% in Peso sul Totale
Calcestruzzo	45
Laterizi	35
Asfalto	10
Altri (metalli, legno, ... etc.)	10

Tabella 1. 4: Composizione Rifiuti C&D Italiani, anno 1992 (Fonte: EDA, 1992)

Molti autori prevedono che nei prossimi decenni si assisterà ad un aumento sempre crescente di produzione di rifiuti C&D dovuto essenzialmente allo scadere della vita utile di vari manufatti attualmente in esercizio.

Tali rifiuti deriveranno da diverse attività quali la costruzione, l'ampliamento, la ristrutturazione, la manutenzione e la demolizione di opere civili o di infrastrutture viarie. Essi sono prevalentemente costituiti da materiali inerti classificabili come rifiuti speciali non pericolosi (CER e D.L. 22/97).

Valorizzare questi ingenti quantitativi potrebbe ridurre considerevolmente l'impatto ambientale generato dalle attività di C&D, innescare positivi processi di innovazione delle tecniche e di qualificazione degli operatori, offrire interessanti opportunità occupazionali. Tuttavia, la gestione ambientalmente sostenibile dei residui prodotti dalle attività C&D trova parecchi ostacoli, di natura sia tecnica (procedure di demolizione, modalità di separazione, sistemi di raccolta e movimentazione), sia non-tecnica (normativi, culturali, economici, organizzativi), che possono essere superati solo creando un sistema di convenienze reciproche fra i diversi operatori coinvolti nel ciclo di produzione – riciclaggio – riutilizzo – smaltimento dei residui.

Fino al Decreto Ronchi, la politica adottata dal nostro paese per i rifiuti derivanti dalla costruzione e demolizione è stata quella dell'abbandono in luoghi non autorizzati. Tale situazione si è venuta a creare, sia per la sporadica presenza di discariche autorizzate sull'intero territorio, sia per la quasi totale mancanza delle norme giuridiche in materia di smaltimento di rifiuti.

La mancanza di una pianificazione e di una disciplina di dettaglio nelle modalità di coltivazione degli inerti, e lo scarso interesse verso la salvaguardia dell'ambiente e del territorio hanno però indotto gli organi competenti a imporre leggi sempre più restrittive per l'apertura di nuove cave e lo sfruttamento di quelle già esistenti. Infatti, sull'esempio di altri Paesi e sotto la spinta di importanti esigenze pratiche, anche in Italia, negli ultimi anni '80, passando per il D.L.22/97, si è avviato il fenomeno del riciclaggio dei rottami edilizi in risposta alle problematiche ambientali [Nicosia, Lucchese, Rizzo, Ercoli, *“Riciclo di rifiuti da demolizione: un contributo all'ecobilancio”*, Palermo, 1998].

Lo smaltimento in discarica, che rappresenta purtroppo ancora la via preferenziale cui sono indirizzati i rifiuti inerti, non è solo un costo ambientale diretto, quello della discarica, ma è anche una potenziale premessa all'abbandono e allo smaltimento abusivo.

Il modo migliore per contrastare gli abbandoni e gli smaltimenti illeciti è quello di costruire un ciclo di recupero dei rifiuti ben funzionante, efficace ed economico.

Partendo da un sistema di recupero ben avviato, con numerosi operatori economici già presenti nel settore, è possibile, incoraggiando buone pratiche, buone tecnologie e gestioni più efficienti, non solo recuperare una quota maggiore dei rifiuti prodotti che sfuggano ai controlli, ma migliorare efficacia e redditività economica delle attività di recupero, ottenendo maggiori prodotti riutilizzabili e prodotti di migliore qualità che consentono un doppio vantaggio: sostituire effettivamente materie prime vergini, con risparmio di cave e territorio, spuntare prezzi migliori e una significativa capacità di affermarsi sul mercato [Iacuzzi R., “*Gestione di rifiuti speciali, materiali recuperabili nella realizzazione di infrastrutture viarie*”, AIAT].

L’accezione di *compatibilità ambientale* dimostra che il rispetto dell’ambiente può incontrare, in un percorso sinergico, l’interesse economico di un settore articolato come è quello delle costruzioni edili e civili.

Tenere distinte terre e rocce di scavo dagli altri materiali di risulta, separare i materiali lapidei inerti dagli altri prodotti di demolizione (metalli, legno ecc.), perseguire cioè la demolizione selettiva, significa recuperare buona parte di ciò che fino a ieri era solo rifiuto, riutilizzarla come nuova *materia prima* e quindi come un bene che ha un valore.

Dai rifiuti di costruzione e demolizione si ricavano eccellenti materiali inerti riciclati, che possono essere efficacemente impiegati in sostituzione di quelli naturali in molte opere, pubbliche e private (Figura 1. 21). A ciò si aggiungono altri due fondamentali vantaggi: il *risparmio di territorio*, per la mancata realizzazione di nuove cave e discariche, ed il *risparmio energetico e idrico*. La produzione di inerte riciclato richiede infatti un minore impiego di energia e acqua, oltre alla riduzione della necessità di trasporti con mezzi pesanti.

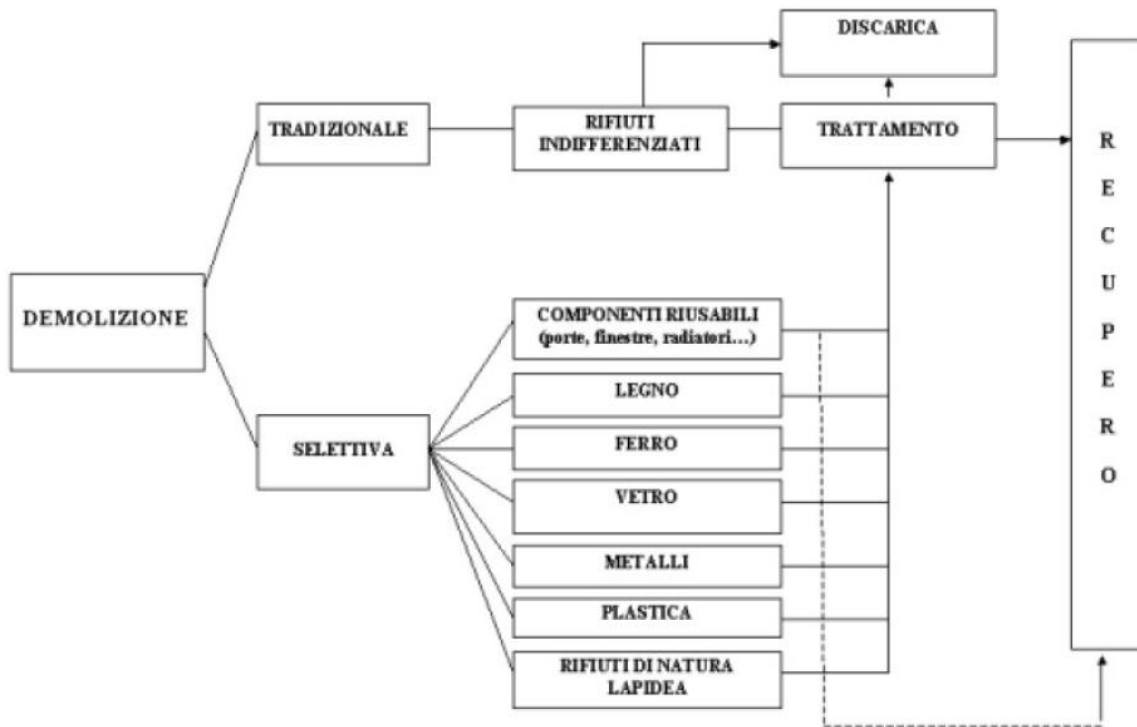


Figura 1. 21Flusso dei Rifiuti da C&D (Fonte: Guidelines on Ind. C&D Waste)

Il processo di produzione dell'aggregato riciclato a partire dai rifiuti da C&D non è molto diverso da quello con cui si ottengono gli inerti naturali di frantumazione dal trattamento di blocchi lapidei provenienti da attività estrattiva e non comporta sostanziali costi aggiuntivi anzi un risparmio energetico (Tabella 1. 5).

Tale processo consiste in tre fasi, sulle quali si basano gli schemi di funzionamento degli impianti per il trattamento delle macerie: la selezione del materiale; la decontaminazione; la riduzione delle pezzature.

Energia (KW/h)	Tipologia di Attività	
	Cava di Pietra Naturale	Impianto di Riciclo di Rifiuti da C&D
Energia per la Frantumazione*	2.5	2.0
Energia per l'Estrazione#	4.0	---
Energia per la Movimentazione#	3.0	0.2
Energia per la Vagliatura*	Inclusa nella Frantumazione	0.2
Energia per la Depolverizzazione	---	0.7

* Energia in KW/h, riferita ad 1 t di inerte

Energia in KW/h, riferita ad 1 m³ di inerte

Tabella 1. 5: Consumi Energetici Stimati per le Varie Fasi di Lavorazione (Nicosia, Lucchese, Rizzo, Ercoli, 2000)

Tali impianti possono essere di tipo semovente (su mezzo gommato o cingolato), di tipo mobile (trasportati per mezzo di rimorchi), oppure fissi.

Le installazioni fisse potrebbero avere lo svantaggio di essere localizzate in una zona distante dal cantiere di demolizione, tuttavia l'onere legato al trasporto delle macerie viene compensato dalla maggiore produttività e dalla migliore qualità del prodotto.

Una corretta dislocazione sul territorio degli impianti fissi sarebbe in tal senso auspicabile e permetterebbe di abbassare il costo dell'inerte di riciclo.

Nel caso dei conglomerati tale operazione può avvenire direttamente in situ azzerando del tutto l'influenza di tale componente di flusso sia sull'ambiente che sui costi economici.

1.3.2.4 RECUPERO DEI RIFIUTI DA C&D

Per quanto riguarda il recupero di tali materiali, con informazioni ormai datate anche sotto questo aspetto, mettendo in relazione la stima del mercato potenziale dei detriti prodotti, elaborata dal CRESME (1998), con i dati forniti dalle 268 imprese di gestione delle discariche autorizzate per rifiuti speciali inerti e di impianti per il trattamento di macerie, si deduce che in Italia solo l'8,8% del totale dei detriti viene riutilizzato o recuperato.

In tal senso si riscontra un certo ritardo rispetto agli altri paesi europei: infatti, già nel 1990 secondo le stime della European Demolition Association (E.D.A.), in Olanda veniva recuperato o riutilizzato il 60% del totale dei detriti, in Gran Bretagna il 42%, in Belgio il 38% e in Germania il 16%. Un ulteriore aggiornamento di tali dati all'anno 1999 è reperibile nel documento redatto dalla Commissione Europea DG ENV.E.3, del 4 Aprile 2000 ed è stato riportato in Tabella 1. 6.

Stato Membro	Produzione di C&D (migliaia di tonnellate)	% materiale riciclato	% materiale conferito in discarica o inceneritore
Germania	59	17	83
Gran Bretagna	30	45	55
Francia	24	15	85
ITALIA	20	9	91
Spagna	13	< 5	> 95
Olanda	11	90	10
Belgio	7	87	13
Austria	5	41	59
Portogallo	3	< 5	> 95
Danimarca	3	81	19
Grecia	2	< 5	> 95
Svezia	2	21	75
Finlandia	1	45	55
Irlanda	1	< 5	> 95
Lussemburgo	-	-	-
TOTALE	180	28	72

Tabella 1. 6: Statistiche di Produzione Rifiuti C&D a Livello Europeo (dati aggiornati al 1999 a cura del Symonds Group)

I dati relativi all'Italia sono molto al di sotto della media europea, con solo il 9% dei rifiuti recuperati e oltre il 90% smaltiti senza alcuna valorizzazione e, per una quota certo non trascurabile, anche in modo abusivo.

Il mercato nazionale dei rifiuti da C&D rimane quindi ancora bloccato, rappresentando di riflesso un problema soprattutto per gli ingenti quantitativi di prodotti (allora, intorno ai 40-46 milioni di tonnellate all'anno mentre, secondo le stime più recenti, oggi tale produzione si attesta a quota 56-61 Mt/a circa).

Le cause di questo ritardo possono essere quindi ritrovate in una serie di motivi che si oppongono ad una diffusione delle tecniche di riciclaggio, tra cui permane la lentezza delle Amministrazioni a recepire le innovazioni tecniche e a modificare quei capitolati, nei quali, si preferisce fare riferimento all'impiego esclusivo di materie prime naturali.

Allo scopo di superare i vincoli formali e le resistenze culturali, appare opportuno integrare la normativa tecnica esistente mediante la definizione di specifici criteri di accettabilità di tali materiali e più efficacemente, informare progettisti, stazioni appaltanti e direttori dei lavori, sulle reali caratteristiche prestazionali dei materiali in questione.

1.4 IL FRESATO O RAP

1.4.1 DEFINIZIONE

Col termine fresato, o più in generale di Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), si indica il materiale di rifiuto ottenuto dalla rimozione di conglomerati bituminosi in opera quindi un rifiuto da Costruzione e Demolizione. Tale rimozione può avvenire per fresatura (da cui appunto il termine fresato) del c.b. tramite fresa autocarrata o per demolizione (scarifica) degli strati bituminosi per mezzo di opportuni macchinari (escavatore, ripper, scraper, altri) che producono blocchi a lastre irregolari di c.b. demolito da frantumarsi, se necessario, in seguito. In termini pratici secondo il SITEB, il cosiddetto “*fresato bituminoso*” è una miscela di aggregati con una curva granulometrica propria caratterizzata da una elevata percentuale di fini e contenente bitume invecchiato. Entrando nel merito delle demolizioni, nel caso in cui sia richiesta una lieve scarifica della pavimentazione, si opera con una fresatrice che arriva a rimuovere conglomerato fino ad una profondità di 50 millimetri per singola passata. Volendo rimuovere completamente la sovrastruttura si ricorre invece a bulldozer o a sistemi pneumatici. A demolizione avvenuta, per il fresato ottenuto, vi sono due possibilità:

- il trasporto in centrale dove verrà trattato con processi di schiacciatura, vagliatura, raccolta e stoccaggio;
- la polverizzazione in sito e la successiva incorporazione negli strati granulari, fondazione o strati di base ad opera di mezzi semoventi.

Analizzando accuratamente le caratteristiche del materiale di risulta dalla demolizione, si riconosce come questo sia un aggregato vero e proprio con una sua curva granulometrica, generalmente caratterizzata da piccole percentuali di materiali fini, che contiene bitume

invecchiato. In alcuni casi il vecchio legante può essere catrame, che provenendo dal carbone, contiene un'alta percentuale d'elementi cancerogeni (PAHs) che ne impediscono il suo reimpiego nella realizzazione di nuove strade attraverso la tecnica del riciclaggio. Nella tecnica stradale il riciclaggio viene definito come: il recupero ed il riutilizzo delle materie prodotte dalla dismissione degli strati di conglomerato bituminoso ammalorati (RAP) per il rifacimento dei diversi strati, superficiali e portanti, costituenti le pavimentazioni stradali. Preliminarmente è necessario il riconoscimento dei requisiti qualitativi del RAP, da valutare all'interno dell'attività di laboratorio e sotto i seguenti aspetti:

- Percentuale di legante;
- Anzianità del legante;
- Tipo e qualità dell'aggregato utilizzato;
- Curva granulometrica.

Le caratteristiche del legante originario sono importanti tanto per assicurarsi che questo sia in grado di recuperare, nella rigenerazione, tutte le caratteristiche perse per invecchiamento ed ossidazione, quanto per assicurarsi che non sia eccessivamente “duro” (è richiesto un bitume che restituisce valori alle prove C.N.R. di penetrazione a 25°C maggiori di 15 dmm e valori del punto di rammollimento minori a 75°C). Per quanto riguarda gli aggregati, che costituiscono l'elemento principale del fresato, questi possono essere calcarei o silicei. E' importante stabilire la loro natura per effettuare scelte idonee al momento della selezione e della formulazione dell'emulsione bituminosa. A tal proposito è buona regola predisporre opportune prove di laboratorio, al fine di verificare la compatibilità col legante, l'opportuna lavorabilità dell'impasto e l'idonea presa finale.

1.4.2 PROPRIETÀ DEL “RAP”

Le caratteristiche prestazionali e quindi anche meccaniche del R.A.P. sono fortemente influenzate dai materiali che lo compongono e dalla funzione che espletava il conglomerato d'origine (strato di base, usura, binder...). Il compito del singolo strato di conglomerato costituente la pavimentazione induce sostanziali differenze nella natura, qualità e pezzatura degli aggregati. In uno strato d'usura, per conferire un'aderenza accettabile, gli inerti devono essere altamente resistenti all'abrasione ed al levigamento. Tali qualità non sono, invece, richieste per confezionare uno strato di binder avente solo una funzione di collegamento.

Il conglomerato bituminoso proveniente dalle vecchie pavimentazioni esauste viene trattato frantumandolo o fresandolo; la prima tecnica comporta una minore percentuale di materiale fino nella miscela di risulta rispetto alla seconda.

La macinatura e la frantumazione del R.A.P. provocano il naturale affinamento della pezzatura degli aggregati in esso contenuti rispetto alla miscela d'origine. Questa diminuzione di pezzatura è imputabile, principalmente, alla macinatura.

In ogni caso, la distribuzione dimensionale delle particelle del R.A.P. macinato può variare molto in funzione dei sistemi usati nella sua produzione e trattamento ed, inoltre, dalla natura degli aggregati in esso contenuti.

Con il trattamento in centrale o in sito il R.A.P. prodotto può essere frantumato, o macinato, in particelle di dimensioni minori di 38 mm sempre che, la massima dimensione degli aggregati, non superi i 63 mm.

L'intervallo di distribuzione delle particelle che risultano normalmente dai processi di frantumazione o macinatura del R.A.P. viene riportato nella Tabella 1. 7.

Dimensione Setacci	% di Passante dopo Fresatura
38.1 mm (1.5 in)	100
25.0 mm (1.0 in)	95-100
19.0 mm (3/4 in)	84-100
12.5 mm (1/2 in)	70-100
9.5 mm (3/8 in)	58-95
4.75 mm (N°4)	38-75
2.36 mm(N°8)	25-60
1.18 mm (N°16)	17-40
0.60 mm (N°30)	10-35 ^a
0.30 mm (N°50)	5-25 ^b
0.15 mm (N°100)	3-20 ^c
0.075 mm (N°200)	2-15 ^d

a. generalmente meno del 30 % c. generalmente meno del 15%
 b. generalmente meno del 20 % d. generalmente meno del 10%

Tabella 1. 7: Composizione Granulare del RAP

Nonostante la carenza in letteratura di dati a disposizione riguardanti il R.A.P. si può affermare che, con una buon'approssimazione, la densità di volume del R.A.P. frantumato, alla fine di tutti i trattamenti, è lievemente inferiore a quello degli aggregati vergini e si colloca tra 1940 e 2300 kg/m³. Generalmente l'umidità naturale del materiale si aggira intorno al 5 % ed un'eventuale esposizione alla pioggia può provocare un incremento fino a valori compresi tra il 7 e l'8 %. Nell'ottica del risparmio energetico la permanenza di R.A.P. nelle riserve dovrà essere minima. Il conglomerato bituminoso proveniente dalla demolizione di pavimentazioni esistenti presenta, usualmente, un contenuto di legante tra il 4.5 ed il 6 %, ed è piuttosto rigido a causa dell'ossidazione subita durante la stesa e in esercizio. Estrahendo ed analizzandolo il bitume dal R.A.P. questo evidenzia una bassa penetrazione ed un alto valore di viscosità che variano con la durata in servizio della pavimentazione originaria. I valori di penetrazione a 25° C si collocano, spesso, nell'intervallo compreso tra i 10 ed gli 80 dmm mentre la viscosità, a 60°C, ha valori che oscillano da un minimo di 2000 ad un massimo di 50000 Poises e, quanto più è esteso il periodo di servizio, tanto più la viscosità cresce. La Tabella 1. 8 presenta in modo

sommario, i valori tipici che possono caratterizzare le proprietà fisiche del R.A.P. oltre alla gradazione degli aggregati già mostrata.

Tipo di Proprietà	Proprietà	Tipico Intervallo di Valori
Proprietà Fisiche	Peso Specifico	1940-2300 kg/m ³
	Contenuto di Umidità	Normale: > 5% Massimo: 7-8%
	Contenuto di Bitume	Normale: 4.5-6% Massimo: 3-7%
	Penetrazione del Bitume	10-80 a 25°C (77°F)
	Viscosità Assoluta	4000-25000 poise a 60°C (140°F)
Proprietà Meccaniche	Peso Specifico del Compattato (asciutto)	1600-2000 kg/m ³
	California Bearing Ratio (CBR) (dopo una settimana)	100% RAP: 20-25% 40% RAP, 60% vergine: ≥ 150%

Tabella 1. 8: Proprietà Fisiche e Meccaniche del R.A.P.

1.5 PNEUMATICI

1.5.1 DEFINIZIONE

Oggi gli pneumatici equipaggiano la maggior parte dei mezzi di trasporto destinati ad un utilizzo su strada, venendo pertanto a costituire un problema significativo alla fine della loro vita utile, dato il peso relativo che i trasporti su strada ricoprono nel sistema di trasporti globale. Essi sono costituiti da una struttura toroidale elastica di gomma naturale o sintetica e possono essere di due tipi:

- I tube type: sono pneumatici con camera d'aria che racchiude l'aria compressa per ottenere un effetto di adattamento e sospensione del veicolo dal terreno; la copertura è costituita da gomma sintetica, essenziale nel trasmettere gli attriti che si generano con il movimento, e tele di fibra o di metallo;
- I tubeless sono pneumatici che posseggono la funzione di camera d'aria e non ne richiedono l'utilizzo, mentre la copertura è identica a quella dei tube type. Attualmente tutte le autovetture vengono prodotte con pneumatici tubeless, mentre gli autobus e gli autocarri utilizzano entrambi i modelli.

La struttura dello pneumatico, rappresentata nella Figura 1. 22: Struttura dello Pneumatico, è costituita dal battistrada e dalla carcassa:

- Il battistrada (1) : è la parte del pneumatico essenziale per l'aderenza con il terreno con il quale è a contatto e consiste in un anello di gomma compatta che avvolge la carcassa. Fondamentale poi è la miscela, che deve garantire un giusto compromesso tra la resistenza all'usura e una buona aderenza in tutte le condizioni di esercizio. Le mescole tradizionali sono costituite da composti elastomeri (gomma naturale, SBR, copolimeri butadiene-stirene, polibutadiene,

polisoprene di sintesi, gomma butilica) in dosi variabili e da additivi (quali il nerofumo, gli oli, i plastificanti e lo zolfo) che permettono di esaltare determinate caratteristiche;



Figura 1. 22: Struttura dello Pneumatico

- La carcassa (2) : è la parte strutturale dello pneumatico su cui è vulcanizzato il battistrada. Ottenuta dalla sovrapposizione di tele incrociate di materiale tessile o sintetico impregnate di gomma ed eventualmente rinforzate con fili metallici, essa termina con due robusti talloni (4) che contengono i cerchietti, formati da anelli di fune metallica che hanno la funzione di mantenere la carcassa ben aderente al cerchio. Le varie tele sono fra loro unite con procedimento di vulcanizzazione che le rende una struttura unitaria. La carcassa di uno pneumatico da autovettura include la componente tessile, non presente invece negli pneumatici per autocarri che invece inglobano una percentuale maggiore di acciaio. La parte laterale della carcassa viene chiamata spalla (3) e assolve due obiettivi: la resistenza alla flessibilità in senso verticale che serve a minimizzare il trasferimento delle irregolarità del terreno sul veicolo e la rigidità orizzontale che serve a trasferire sul terreno i carichi dovuti a sottosterzo, frenata e accelerazione.

1.5.2 COMPOSIZIONE DEGLI PNEUMATICI

La composizione degli pneumatici da autovettura è diversa da quella degli pneumatici da autocarro. Queste differenze non si esprimono solo in termini di dimensioni, di acciaio o tessile inclusi nella loro struttura, ma anche nei tipi e nelle proporzioni tra gomma naturale e sintetica, nerofumo e silice e gli altri ingredienti usati nelle mescole.

Pneumatico Autocarro

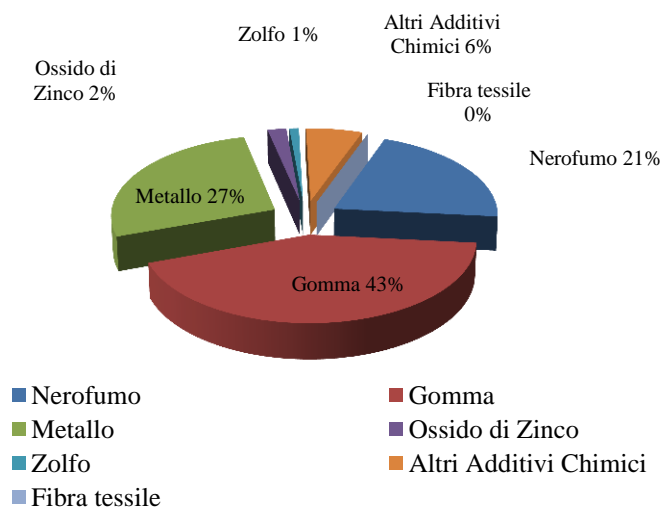


Figura 1. 23: Composizione Media dei Pneumatici degli Autocarri

Pneumatici Autoveicolo

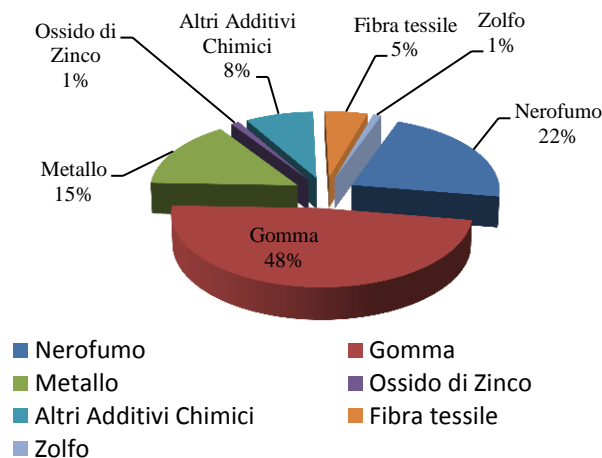


Figura 1. 24 : Composizione Media dei Pneumatici degli Autoveicoli

Nella Figura 1. 1Figura 1. 23 e nella Figura 1. 24 sono riassunte le composizioni medie degli pneumatici di autoveicoli ed autocarri. Ciascun ingrediente della mescola contribuisce a dare allo pneumatico delle specifiche caratteristiche al fine di favorirne una vita più lunga. Per attribuire alla gomma cruda delle caratteristiche tecniche di robustezza ed elasticità occorre sottoporla a processi di vulcanizzazione che diano origine a legami tra le molecole che la compongono con l'ulteriore conseguenza di un'elevata resistenza all'azione di microrganismi, che impiegano più di 100 anni prima di riuscire a distruggerli, rendendo impossibile lo smaltimento degli pneumatici, quando questi diventano rifiuto (PFU), nelle discariche. Con l'entrata in vigore in Italia del D.lgs 36/2003, che recepisce la direttiva europea 99/31/CE, lo smaltimento obbligatorio per tali categorie di residui è stata individuata negli impianti di recupero di materia e energia.

1.5.3 GESTIONE DEGLI PNEUMATICI

Nel 2009 l'Unione Europea ha affrontato la sfida di gestire, nel rispetto di criteri ecologici, 3.2 milioni di tonnellate di pneumatici usati PU, di cui 581 mila tonnellate vengono avviate al riutilizzo, ricommercializzazione o esportazione, mentre circa 2.6 milioni di tonnellate rimangono nel mercato come PFU. I dati raccolti dall'ERTMA (European Rubber & Tyre Manufacturers' Association) mostrano che la gestione di una tale mole di materiale è stata possibile solo con la diffusione di sistemi di gestione in grado valorizzare i materiali attraverso il riciclaggio. Il problema è aggravato dalla presenza di discariche interrato di PFU, stimati in circa 5.5 milioni di tonnellate. La ricerca e la promozione di metodi innovativi per il trattamento e il riciclo tende a creare un mercato sostenibile per i derivati dei PFU in grado di assorbire nei prossimi anni questi materiali stoccati in depositi pericolosi. La nascita di prodotti innovativi sia per le industrie che per i consumatori ha permesso negli ultimi 16 anni un aumento costante del tasso di raccolta dei PFU, fino a raggiungere il 95% nel 2009. La Figura 1. 25 mostra tale andamento, con una crescita media annua del 25% delle quantità recuperate, costituendo un riscontro positivo dell'efficacia delle politiche di gestione adottate.

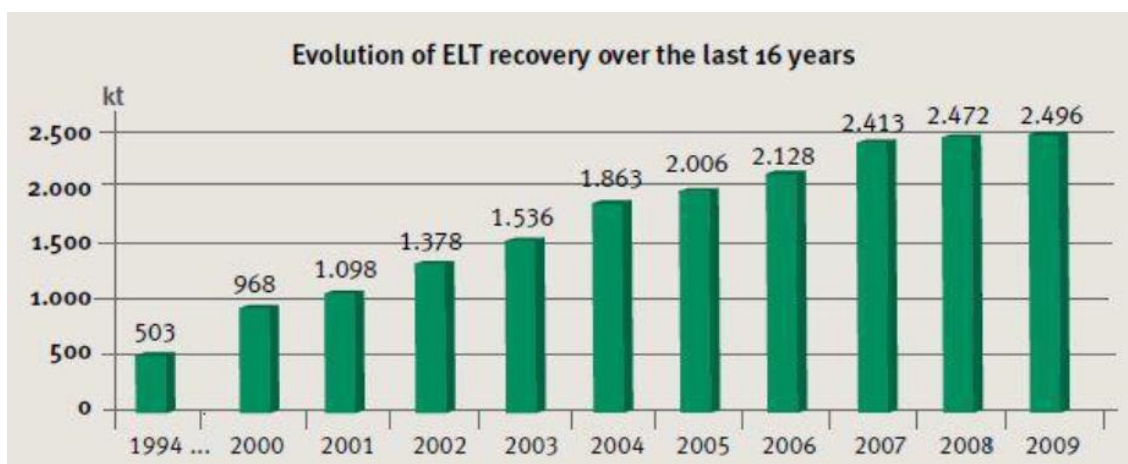


Figura 1. 25: Evoluzione del Recupero di PFU negli Ultimi 16 Anni

Oggi in Europa esistono tre diversi sistemi di gestione dei PFU:

- Sistema a tassazione: vige in Danimarca e Slovacchia. Ciascun paese è responsabile per il recupero e il riciclo dei PFU. I produttori pagano una tassa allo Stato che è responsabile dell'organizzazione e remunera gli operatori nella catena del recupero. La tassa viene successivamente applicata al consumatore;
- Libero mercato: vige in Austria, Bulgaria, Croazia, Germania, Irlanda, Regno Unito e Svizzera. La legge stabilisce gli obiettivi da raggiungere e i referenti per i singoli settori di attività ma non prevede il responsabile di filiera. In tal modo tutti gli operatori del sistema stipulano contratti secondo le condizioni del libero mercato e agiscono in conformità con la locale legislazione sui rifiuti;
- Responsabilità del produttore: vige in Belgio, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Italia, Norvegia, Polonia, Paesi Bassi, Portogallo, Romania, Slovenia, Spagna, Svezia, Turchia, Ungheria. La legge definisce l'assetto legale e conferisce la responsabilità ai produttori di organizzare la gestione dei PFU. Questo sistema ha portato alla costituzione di società senza scopo di lucro per gestire i PFU attraverso le soluzioni più economiche. I produttori hanno l'obbligo di monitorare e rendicontare alle autorità nazionali, il che rappresenta un buon esempio di trasparenza e tracciabilità. I costi di gestione sono pagati attraverso un contributo indicato chiaramente al momento dell'acquisto dagli utenti, attraverso il principio "chi inquina paga".

L'obiettivo comune di tali sistemi è lo smaltimento dei PFU tramite il recupero di materiali ed energia, da cui si traggono vantaggi ambientali e economici: il riutilizzo di una risorsa che, se non recuperata, sarebbe non biodegradabile ed andrebbe ad occupare depositi e discariche con gravi danni per l'ambiente e la salute; la bonifica di discariche o

depositi abusivi; l'impiego al posto di preziose materie prime, spesso d'importazione; la riduzione della quantità di rifiuti e conseguentemente minori costi per la collettività; miglioramento della bilancia commerciale relativamente a importazione di combustibili tradizionali.

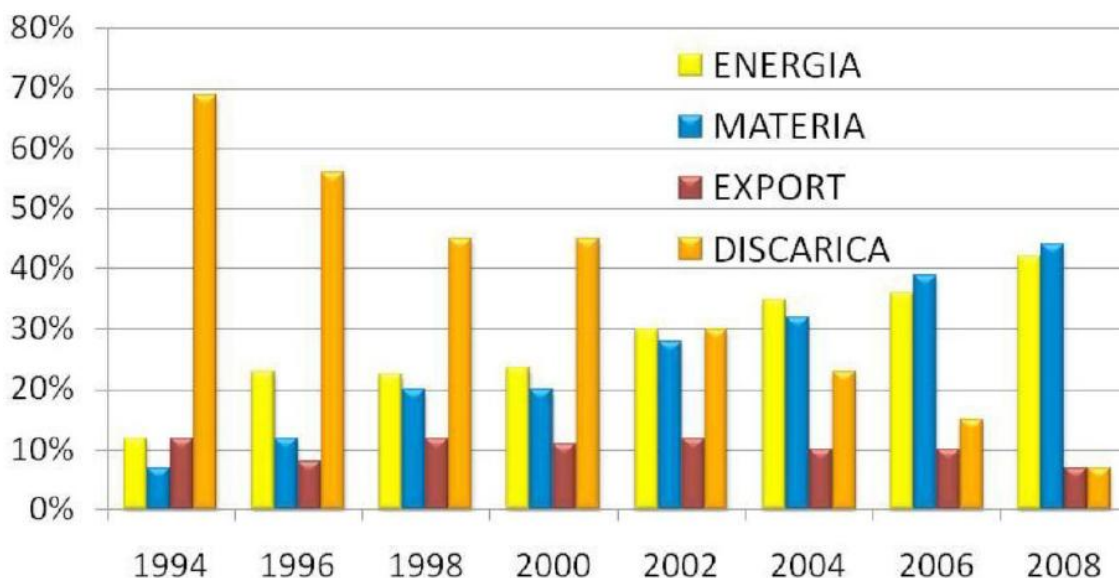


Figura 1. 26: Principali Utilizzi dei PFU in Europa (Fonte: ETRMA, 2008)

Il PFU grazie alle caratteristiche chimico-fisiche del materiale, si presta per l'utilizzo in numerose applicazioni sotto forma di granulo di varie dimensioni. Inoltre è caratterizzato da un potere calorifico pari a quello del carbone e ciò lo rende fonte energetica oggi largamente usata per soddisfare la domanda di settori industriali come i cementifici e le centrali di produzione di energia/vapore, che lo utilizzano sotto vari formati (ciabattato, cippato o intero). Nella Figura 1. 26 sono mostrati i principali utilizzi dei PFU in Europa dal 1994 al 2008, mostrando un consistente aumento del recupero di materia, che è passato dal 6% del 1994 a oltre il 40% del 2008. Per quanto attiene l'Italia, l'Ecopneus, secondo stime di massima, valuta la produzione annuale di PFU in 380.000 tonnellate, di cui 180.000 sono avviati al recupero energetico, 100.000 al recupero di materiale, mentre la quota rimanente viene dispersa in traffici e pratiche illegali o comunque fuori controllo.

L'assenza di un sistema integrato di gestione a livello nazionale ha generato una situazione caratterizzata da un mancato controllo sui flussi di questo materiale, insufficiente implementazione di utilizzi di PFU e suoi derivati, assenza di una razionalizzazione tra le parti del sistema di gestione. Queste carenze non permettono di garantire la tutela dell'ambiente, come è evidenziato da numerosi casi di discariche illegali, abbandoni e incendi di PFU ben documentati dal dossier di Legambiente "Copertone selvaggio". Oggi sono circa 30.000 i punti in cui viene generato il PFU: gommisti, stazioni di servizio, officine, sedi di flotte su tutto il territorio nazionale. Migliaia sono poi le aziende autorizzate al prelievo e al trasporto, con destinazione agli oltre 50 impianti di trattamento, siti in cui i PFU vengono preparati per il successivo recupero energetico o di materiale.

1.5.4 LE MODALITÀ DI RECUPERO DEI PFU

I dati raccolti dall'ETRMA evidenziano come dal 1996 vi sia stato un continuo declino dello smaltimento in discarica dal 32% al 4% del 2009, mentre la via del riutilizzo, la ricommercializzazione, il riciclaggio e il recupero di energia e materiale ha raggiunto il 96% degli pneumatici usati. I maggiori mercati nel 2009 sono stati il recupero di energia 45% e il recupero di materiali 41%, risultati del tutto eccezionali se confrontati con i tassi di recupero di altri settori quali la carta (72.2%) e la plastica (54%). Secondo il principio della “gerarchia dei rifiuti”, la via del riutilizzo degli pneumatici deve rappresentare una priorità rispetto al riciclaggio e deve essere incoraggiata attraverso apposite normative. Quando invece gli pneumatici sono troppo usurati per essere riutilizzati per il loro scopo originario, sono considerati pneumatici fuori uso e entrano in un sistema di gestione basato sul riciclo al fine di ottenere altri prodotti altrettanto utili attraverso il recupero di materiale oppure, ove ciò non fosse possibile, un recupero di energia. Contrariamente ad altri tipi di rifiuti quali ad esempio i contenitori di vetro, gli imballaggi, i metalli e la carta, gli pneumatici usati sono difficili da riciclare. Il riciclaggio completo, che consisterebbe nel processare gli pneumatici usati per ottenere materie prime, non è attualmente possibile a causa delle difficoltà incontrate nei pretrattamenti di completa devulcanizzazione (rottura dei legami del carbonio con lo zolfo) della gomma. Tra i vari possibili procedimenti di riciclo, le tecnologie di macinazione, trattamento termico, incenerimento, gassificazione e pirolisi, rappresentano soluzioni utili al recupero di materia e energia dagli pneumatici fuori uso. Tra le tecnologie di macinazione più diffuse in Italia abbiamo la granulazione a temperatura ambiente, la granulazione criogenica e il processo elettrotermico, mentre un nuovo metodo per dismettere i PFU, consentendo di separare i componenti attraverso la tecnologia “water jet”, sta cominciando ad affermarsi.

1.6 CONCLUSIONI

Il fresato è definito dalla normativa vigente un rifiuto di costruzione e demolizione e per le sue proprietà meccaniche e fisiche può essere considerato un vero e proprio inerte. Per limitare lo sfruttamento delle risorse naturali, tale rifiuto deve essere valorizzato e riutilizzato. Dal punto di vista economico la sostituzione, anche parziale, degli aggregati naturali i cui costi sono sempre più elevati, diviene sempre più economicamente vantaggiosa; ciò è anche rafforzato dal fatto che tramite sperimentazioni, sia in laboratorio sia in sito, è possibile valutarne le qualità ai fini del loro impiego nella costruzione di infrastrutture viarie.

Il ricorso a tecniche di riciclaggio, quale strumento manutentorio di valorizzazione del patrimonio stradale, trova quindi più che ampia giustificazione, nella migliore salvaguardia ambientale, nella riduzione dei costi di produzione, nell'incremento della produzione e nell'eliminazione degli oneri di smaltimento dei materiali risultanti dalla demolizione delle pavimentazioni degradate. Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali è oggi possibile con tecniche a caldo, con impiego di bitumi tradizionali o modificati, e a freddo con impiego di emulsioni bituminose modificate o bitumi schiumati, per strati superficiali o profondi, sia "in impianto" che "in situ". Con la tecnica a caldo, in cui le temperature del legante e degli inerti devono essere molto elevate, si possono ottenere conglomerati bituminosi con caratteristiche fisico meccaniche molto buone, prossime a quelle dei conglomerati bituminosi nuovi. La tecnologia a freddo consente di realizzare, a partire da materiale bituminoso fresato ed emulsione bituminosa, un conglomerato bituminoso dalle caratteristiche simili a quello ottenuto con i metodi tradizionali senza ricorrere ad un elevato consumo di energia termica con risvolti significativi dal punto di vista energetico, ambientale ed economico. In questa sede verrà esaminato il riciclaggio a

freddo, ed in particolare quello con emulsione bituminosa, che sarà abbinato al polverino di gomma nel confezionamento di miscele atte a valutarne un uso congiunto nelle operazioni di riciclaggio nel settore delle pavimentazioni stradali.

Per proseguire efficacemente la trattazione di questa materia è però prima necessario fornire indicazioni sulla normativa italiana ed europea che interessa da vicino il settore stradale; questo aspetto viene affrontato al capitolo successivo.

CAPITOLO 2

IL QUADRO NORMATIVO

2.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo sono riportati i principali riferimenti legislativi a livello comunitario, nazionale e locale riguardanti le attività coinvolte nel processo di riciclaggio dei rifiuti per la loro utilizzazione nella costruzione di opere stradali, accompagnati dai principali documenti ausiliari, quali sentenze e disposizioni applicative a completamento del suddetto quadro legislativo.

2.2 LEGGI COMUNITARIE E NAZIONALI

Il quadro legislativo comunitario e nazionale si è molto evoluto nell'ultimo decennio, elevando le problematiche del riciclaggio dei rifiuti al rango di fattore fondamentale per il raggiungimento dell'obiettivo di sostenibilità dello sviluppo. Del Programma quadro di Azione Ambientale dell'Unione Europea può darsi una descrizione sintetica utilizzando la parola d'ordine delle 4R, ovvero le quattro strategie operative che riguardano:

- **Riduzione** della quantità di rifiuti prodotti;
- **Riutilizzo** dei prodotti;
- **Riciclaggio** ed il recupero dei materiali;
- **Recupero** di energia.

Nel paragrafo che segue sono tratteggiate le principali Direttive della Comunità e poi dell'Unione Europea destinate a dare esecuzione alle prime tre delle dette quattro strategie operative, che hanno diretta attinenza con il tema del recupero di materia nelle costruzioni stradali.

2.2.1 UNIONE EUROPEA – DIRETTIVE, NORMATIVE ED ATTIVITÀ DELLE COMMISSIONI

La Direttiva 99/31/CE costituisce la direttiva di riferimento per le discariche di rifiuti e mira a prevenire o a ridurre le ripercussioni negative sull'ambiente. La proposta specifica le diverse categorie di rifiuti (rifiuti urbani, pericolosi, non pericolosi e inerti) e si applica a tutte le discariche definite come un'area di smaltimento dei rifiuti adibita al deposito degli stessi sulla o nella terra. Essa classifica le discariche in tre categorie: discariche per rifiuti pericolosi; discariche per rifiuti non pericolosi; discariche per rifiuti inerti.

Sono invece esclusi dall'ambito di applicazione della direttiva:

- l'uso di rifiuti inerti in lavori di accrescimento e ricostituzione nelle discariche;
- il deposito di terra non inquinata o di rifiuti inerti non pericolosi, ricavati dalla prospezione ed estrazione, dal trattamento e dallo stoccaggio di minerali nonché dallo sfruttamento di cave;

Viene definita una procedura uniforme di ammissione dei rifiuti allo scopo di evitare ogni pericolo e vengono individuati i rifiuti che non sono ammessi in una discarica.

La Direttiva 75/442/CEE del 15 luglio 1975, direttiva quadro sui rifiuti, modificata dai seguenti provvedimenti:

- direttiva 91/156/CEE del Consiglio, del 18 marzo 1991;
- direttiva 91/692/CEE del Consiglio, del 23 dicembre 1991;
- decisione 96/350/CE della Commissione, del 24 maggio 1996;
- direttiva 96/59/CE del Consiglio, del 16 settembre 1996,

mira ad istituire una gestione coordinata dei rifiuti nella Comunità al fine di limitarne la produzione.

La Decisione 2000/532/CE della Commissione, del 3 maggio 2000, (modificata dalle decisioni 2001/118/CE, 2001/119/CE e 2001/573/CE) sostituisce la decisione 94/3/CE (che istituisce un elenco di rifiuti conformemente all'articolo 1, lettera a), della direttiva 75/442/CEE del Consiglio relativa ai rifiuti) e la decisione 94/904/CE del Consiglio (che istituisce un elenco di rifiuti pericolosi ai sensi dell'articolo 1, paragrafo 4, della direttiva 91/689/CEE del Consiglio relativa ai rifiuti pericolosi); essa unifica a livello comunitario l'elenco dei rifiuti pericolosi istituito dalla decisione 94/904/CE e l'elenco dei rifiuti istituito dalla decisione 94/3/CE, abrogando le due decisioni a partire dal 1° gennaio 2002.

2.2.2 DECRETO LEGISLATIVO 5 FEBBRAIO 1997, N. 22

Grazie al recepimento delle Direttive Europee 91/156/CEE, 91/689 CEE E 94/62/CEE, relative rispettivamente a rifiuti, rifiuti pericolosi e rifiuti da imballaggio, si è pian piano introdotto nel quadro legislativo italiano una visione del rifiuto non più termine della catena dei consumi, ma come punto di partenza per cicli produttivi innovativi, in grado di sfruttare le potenzialità residue di ciascun elemento residuo.

Il principale strumento legislativo del settore è il decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi) di attuazione delle direttive suddette, sul quale si basano tutte le attività legislative successive. L'art. 4 del decreto riveste particolare importanza ai fini del trattamento e del reimpiego dei rifiuti da Costruzione e Demolizione; in esso viene stabilito che le autorità competenti devono favorire ed incentivare le attività di recupero e riciclaggio dei rifiuti, anche attraverso la stipula di accordi con i soggetti economici interessati alle suddette attività, con la possibilità di stabilire agevolazioni in materia di adempimenti amministrativi ed il ricorso a strumenti economici, secondo le modalità specificate al successivo art.25. Al Capo IV del decreto viene invece definito l'iter da seguire per ottenere l'autorizzazione alla realizzazione ed all'esercizio di impianti di smaltimento e recupero dei rifiuti nonché le autorizzazioni necessarie per la realizzazione di impianti di ricerca e sperimentazione. Negli art. 31 e 33 sono definite le procedure semplificate per l'esercizio delle operazioni di recupero dei rifiuti.

2.2.3 DECRETO MINISTERIALE 5 FEBBRAIO 1998, CON MODIFICHE INTRODOTTE DAL D.M. 9 GENNAIO 2003, DAL D.M. 27 LUGLIO 2004 E DAL D.M. 5 APRILE 2006, N. 186

Il Decreto del Ministro dell'Ambiente del 5/02/98 contiene l'elenco delle attività di recupero che ai sensi degli artt. 31 e 33 del D.Lvo 22/97 possono essere autorizzate secondo procedure semplificate. Queste ultime, a differenza di quelle di tipo ordinario, hanno un iter più veloce sia in termini di durata del procedimento autorizzativo (90 giorni e non i 150 giorni previsti nel caso di procedura ordinaria) sia in termini di documentazione da presentare. La motivazione di questa diversità sta nel fatto che i procedimenti elencati nell'allegato 1 sub-allegato 2 del predetto decreto sono ritenuti dal legislatore sistemi di recupero dei rifiuti consolidati, di cui, cioè, si conosce il grado di efficacia e di sicurezza sotto il profilo ambientale.

L'art. 3 del D.M. 5/02/98, con riferimento al recupero di materiali individuati all'allegato 1, stabilisce che le attività ed i procedimenti tesi al riciclaggio od al recupero di tali materiali devono garantire l'ottenimento di materie prime o materie prime secondarie con caratteristiche merceologiche conformi alla normativa di settore e nelle forme usualmente commercializzate. I rifiuti provenienti dal recupero e dal riciclaggio dei rifiuti non devono presentare caratteristiche di pericolo superiori a quelle dei prodotti e delle materie derivanti dall'utilizzo di materie prime vergini.

Il Decreto del Ministro dell'Ambiente del 5/04/06, n. 186, emanato per adeguare "sollecitamente e compiutamente" il D.M. 5/02/98 alle indicazioni fornite dalla Corte Europea di Giustizia nella sentenza 7 ottobre 2004, causa C-103/02, ha introdotto numerose variazioni nel testo dell'articolato del D.M. 5/02/98. Quelle di maggiore interesse per il settore stradale riguardano le quantità ammesse a recupero in procedura semplificata, le procedure di campionamento (UNI 10802), il test di cessione.

Nell'allegato 1, sub-allegato 1, per i conglomerati bituminosi si prevede, al punto 7.6, quanto segue:

7.6 **Tipologia:** conglomerato bituminoso, frammenti di piattelli per il tiro al volo[170302][200301].

7.6.1 **Provenienza:** attività di scarifica del manto stradale mediante fresatura a freddo; campi di tiro al volo.

7.6.2 **Caratteristiche del rifiuto:** rifiuto solido costituito da bitume ed inerti.

7.6.3 **Attività di recupero:**

- a) produzione conglomerato bituminoso "vergine" a caldo e al freddo [R5];
- b) realizzazione di rilevati sottofondi stradali (il recupero è subordinato all'esecuzione del test di cessione sulla rifiuto alla quale secondo il metodo in allegato 3 al presente decreto) [R5];
- c) produzione di materiale per costruzioni stradali e piazzali industriali mediante selezione preventiva (macinazione, vagliatura, separazione dalle frazioni indesiderate, eventuale miscelazione con materia inerte vergine) con eluato conforme al test di cessione secondo il metodo in allegato 3 al presente decreto [R5].

7.6.4 **Caratteristiche delle materie prime e/o dei prodotti ottenuti:**

- a) conglomerato bituminoso nelle forme usualmente commercializzate.
- b) Materiali per costruzioni nelle forme usualmente commercializzate.

Inoltre l'allegato 4, sub-allegato 1 riporta le quantità massime di rifiuti non pericolosi di cui all'allegato 1, sub-allegato 1 avviabili a diverse attività di recupero per diverse tipologie di rifiuto. In corrispondenza della voce "Produzione di conglomerati bituminosi", per la tipologia 7.6 suddetta, comprendente quindi i rifiuti individuati dei codici CER [170302][200301], tale quantità massima risulta fissata in 50.230 ton/anno.

Infine, sono state riordinate anche le norme riguardanti le terre e rocce da scavo, oggetto di un annoso contenzioso con le autorità comunitarie.

Ad alcune di tali modifiche sarà fatto specifico cenno nei paragrafi seguenti.

2.2.4 CODICI CER DI INTERESSE PER LE OPERE STRADALI

Negli ultimi anni, soprattutto a causa della riduzione della disponibilità di risorse naturali, si è sviluppato un interesse sempre maggiore nella ricerca di materiali alternativi o di recupero da utilizzarsi nel settore delle costruzioni stradali. Si tratta di materiali “ambientalmente sostenibili”, derivanti dal riciclaggio di quelli già presenti sulla pavimentazione o di prodotti di scarto derivanti da lavorazioni industriali e dal recupero di materiali locali di scarsa qualità, il cui impiego risulta di notevole importanza poiché:

- consente la riduzione dello sfruttamento delle cave di prestito e la difesa del regime idrogeologico degli alvei, ottenendo così un migliore utilizzo delle risorse non rinnovabili ed una maggior protezione e salvaguardia dell’ambiente;
- permette una migliore gestione delle discariche, in quanto diminuisce la quantità di materiale da smaltire;
- consente notevoli vantaggi economici derivanti dalla possibilità di ridurre l’uso di inerti pregiati di difficile approvvigionamento e molto costosi;
- permette l’utilizzo di materiali di scarsa qualità disponibili in cantiere riducendo i costi di trasporto dalle cave di prestito e verso i luoghi di rifiuto, con un notevole incremento dell’economia dei procedimenti di costruzione.

A tal fine in questo paragrafo ci si propone di analizzare l’Elenco dei Rifiuti, contenuto nell’Allegato D del D.M. 5/02/98 ed istituito conformemente all’articolo 1, lettera a), della direttiva 75/442/CEE relativa ai rifiuti e all’articolo 1, paragrafo 4, della direttiva 91/689/CEE relativa ai rifiuti pericolosi, con lo scopo di individuare quali di questi possano essere impiegati come materiali alternativi, in sostituzione degli inerti vergini, nel confezionamento degli strati di una sovrastruttura stradale o all’interno del corpo del rilevato.

In particolare verranno approfondite le seguenti tecnologie di recupero:

- R5: Riciclo/recupero di altre sostanze inorganiche;
- R13: Messa in riserva di rifiuti per sottoporli a una delle operazioni di recupero.

La Direttiva del Ministero dell’Ambiente del 9 aprile 2002 “Norme per l’esecuzione della Decisione 2000/532/CE come modificata dalle decisioni 2001/118/CE, 2001/119/CE e 2001/573/CE” introduce delle modifiche al C.E.R. (Catalogo Europeo dei Rifiuti). A tale nuovo Elenco dei rifiuti (CER 2002) faremo esplicito riferimento nelle classificazioni seguenti. Viene inoltre precisato che l’inclusione di un determinato materiale nell’elenco non attribuisce allo stesso la natura di rifiuto di ogni circostanza, in quanto la classificazione del materiale come rifiuto si applica solo se questo risponde alla definizione della direttiva 75/442/CEE. Per la numerazione delle voci contenute nell’elenco sono state applicate le regole previste dalla Direttiva precedentemente richiamata: per i rifiuti rimasti invariati sono stati utilizzati i numeri specificati nella decisione 94/3/CE della Commissione, mentre i codici dei rifiuti che hanno subito modifiche sono stati cancellati e non vengono più citati per evitare confusioni dopo l’adozione del nuovo elenco. La stessa Direttiva prevede inoltre uno specifico allegato con lo schema di trasposizione dei vecchi codici CER nei nuovi codici dell’Elenco dei Rifiuti 2002.

La tabella dei nuovi codici risulta così strutturata: nella prima colonna viene riportato il codice CER del rifiuto impiegabile nella costruzione e manutenzione di opere stradali secondo la nuova classificazione introdotta dalla Direttiva del Ministero dell’Ambiente del 9 aprile 2002 già citata (Codice CER); nella seconda colonna è riportata la descrizione della stessa tipologia di rifiuto secondo quanto riportato nell’allegato A della Direttiva del Ministero dell’Ambiente del 9 aprile 2002 (descrizione); nella terza colonna viene indicata la relativa tipologia di rifiuto (con il richiamo al paragrafo di riferimento)

così come classificato nell'allegato 1 – sub-allegato 1 del Decreto Ministeriale 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” (tipologia); nella quarta ed ultima colonna si riportano le attività di recupero previste per quella determinata tipologia di rifiuto dal Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998 di particolare interesse per le opere stradali e viene indicata per ciascuna la classifica così come previsto dall'articolo 6, comma 1, lettera h del Decreto Legislativo 5 febbraio 1997 n. 22 e come definita nell'Allegato C della stessa legge (attività di recupero prevista); inoltre per ciascuna attività di recupero viene segnalata tramite un apposito richiamo (*) se esso è subordinato all'esecuzione del test di cessione sul rifiuto tal quale secondo il metodo descritto in allegato 3 del DM 5/2/98.

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

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

I codici CER che individuano i due rifiuti in questione, entrambi appartenenti prevalentemente alla macrocategoria CER 17, sono riportati nella successiva Tabella 2. 1:

Tipologia	CER	Descrizione
C&D	10	RIFIUTI PRODOTTI DA PROCESSI TERMICI
	10 13	rifiuti della fabbricazione di cemento, calce e gesso e manufatti di tali materiali
	10 13 11	rifiuti della produzione di materiali compositi a base di cemento, diversi da quelli di cui alle voci 10 13 09 e 10 13 10
	17	RIFIUTI DELLE OPERAZIONI DI COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE (COMPRESO IL TERRENO PROVENIENTE DA SITI CONTAMINATI)
	17 01	cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche
	17 01 01	cemento
	17 01 02	mattoni
	17 01 03	mattonelle e ceramiche
	17 01 07	miscugli o scorie di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche, diverse da quelle di cui alla voce 17 01 06
	17 08	materiali da costruzione a base di gesso
	17 08 02	materiali da costruzione a base di gesso diversi da quelli di cui alla voce 17 08 01
	17 09	altri rifiuti dell'attività di costruzione e demolizione
	17 09 04	rifiuti misti dell'attività di costruzione e demolizione, diversi da quelli di cui alle voci 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03
Fresato	17 03	miscele bituminose, catrame di carbone e prodotti contenenti catrame
	17 03 01*	Miscele bituminose contenenti catrame di carbone
	17 03 02	miscele bituminose diverse da quelle di cui alla voce 17 03 01

Tabella 2. 1: Categorie di Rifiuti di Interesse per il Riciclaggio nelle Pavimentazioni Stradali

Si osserva che in Italia nel confezionamento di miscele bituminose non è consentito l'impiego di catrame come legante e, pertanto, il fresato risulta di norma individuato dal CER 17 03 02. I rifiuti di cui sopra sono definiti rifiuti speciali in quanto materiali di scarto di attività produttive specifiche.

In Italia, così come in Europa, la diversificazione dei processi produttivi ha determinato una moltiplicazione della tipologia dei rifiuti, con effetti sempre più negativi per l'ambiente.

La possibilità di recuperare, in tutto o in parte, alcune tipologie di rifiuto nell'ambito delle opere stradali sotto forma di materie prime seconde diventa quindi una esigenza primaria.

La suddetta tabella rappresenta un utile riferimento, un punto di partenza per quanti siano coinvolti nel processo di costruzione, gestione, manutenzione e progettazione delle infrastrutture viarie. Anche da una rapida analisi dell'elenco dei codici, è possibile comprendere le grandi potenzialità offerte dalle opere stradali per recuperare nei cicli produttivi una grande varietà di materiali non altrimenti utilizzabili.

2.2.5 VERIFICHE DI COMPATIBILITÀ AMBIENTALE

La prescrizione numero 3 della Direttiva sui Materiali da Costruzione della Comunità Europea (89/106/EEC) richiede di valutare l'aspetto di compatibilità ambientale e di rischio di contaminazione del terreno o dell'acqua da parte degli stessi materiali. Con riferimento alla legislazione nazionale, l'art. 7 del D.Lgs.22/97 classifica i rifiuti (secondo l'origine) in rifiuti urbani e speciali e (secondo le caratteristiche di pericolosità) in rifiuti pericolosi e non pericolosi. Dal 1/1/2002, ai sensi della decisione 2000/532/CE e succ. mod. ed integrazioni, i rifiuti vengono classificati anche in base alla presenza di sostanze pericolose presenti in determinate concentrazioni limite (CL).

I soggetti che intendono realizzare nuovi impianti di smaltimento o di recupero di rifiuti sono tenuti a presentare domanda alla Regione competente per territorio. Anche l'esercizio delle operazioni di smaltimento e di recupero di rifiuti deve essere autorizzato dalla Regione. Esiste l'Albo delle imprese sottoposte ad iscrizione, al quale tutte le imprese che svolgono attività di gestione dei rifiuti (raccolta, trasporto, smaltimento, recupero) devono essere obbligatoriamente iscritte.

Per l'impiego dei rifiuti "Non Pericolosi" di specifico interesse per le opere stradali, esiste la concreta possibilità di avviare le attività di gestione dei rifiuti avendo semplificato l'iter burocratico-amministrativo necessario per ottenere le relative autorizzazioni.

É possibile usufruire di queste procedure per:

- Auto-smaltimento, cioè lo smaltimento di rifiuti non pericolosi effettuati nel luogo di produzione dei rifiuti stessi;
- il recupero dei rifiuti.

Tali attività possono essere intraprese decorsi novanta giorni dalla comunicazione di inizio attività alla provincia territorialmente competente.

Nel nostro caso le imprese interessate, per poter mettere in riserva [R13] o recuperare i rifiuti nei propri processi produttivi [R5], potranno accedere alla procedura semplificata mediante comunicazione di inizio attività per l'esercizio delle operazioni di recupero dei rifiuti non pericolosi, ai sensi dell'art. 33 comma 1 del D.Lgs. 22/97 e del D.M. 05/02/98. In termini di "compatibilità ambientale" tali richieste dovranno includere:

- l'autorizzazione alle emissioni in atmosfera dell'impianto, di cui al D.P.R. 203/88;
- l'autorizzazione agli scarichi ai sensi del D.Lgs. 152/99 e s.m.i.;
- i risultati del test di cessione eseguito secondo le procedure previste in All. 3 al D.M. 5/2/98 su campioni ottenuti nella stessa forma fisica prevista nelle condizioni finali d'uso.

Il "test di cessione", così come descritto dal D.M. 5/2/98, prescriveva di valutare la compatibilità ambientale del materiale di prova mediante l'analisi dell'eluizione dei singoli componenti ottenuta mediante immersione del campione solido in acqua deionizzata, rinnovata ad intervalli di tempo prestabiliti, per un totale di durata della prova di 16 giorni. La concentrazione da confrontare con il limite imposto per ciascuna componente era calcolata come somma delle concentrazioni trovate in corrispondenza di tutte le varie fasi di eluizione.

La procedura di prova e la verifica di eco compatibilità sono state oggetto di diverse critiche in quanto:

- anche per i riciclati "migliori" risulta difficile rispettare i limiti imposti dall'All. 3 al D.M. 5/2/98;
- la procedura di prova risulta comunque piuttosto lunga e laboriosa;
- non si considera la ratio del "Decreto Ronchi" per quanto riguarda il recupero dei rifiuti e la verifica di compatibilità ambientale.

Essa non dovrebbe prevedere il semplice rispetto di valori limite stabiliti a priori ma piuttosto verificare che i materiali analizzati non presentino caratteristiche di pericolosità superiori a quelle di analoghe materie prime vergini. In questo modo un materiale di rifiuto da impiegare per la costruzione del rilevato dovrebbe essere confrontato con una terra di analoghe caratteristiche tecniche.

Parametri	Unita' di misura	Concentrazioni limite
Nitrati	Mg/l NO ₃	50
Fluoruri	Mg/l F	1,5
Solfati	Mg/l SO ₄	250
Cloruri	Mg/l Cl	100
Cianuri	microngrammi / l Cn	50
Bario	Mg/l Ba	1
Rame	Mg/l Cu	0.05
Zinco	Mg/l Zn	3
Berillio	microngrammi / l Be	10
Cobalto	microngrammi/l Co	250
Nichel	microngrammi/l Ni	10
Vanadio	microngrammi/l V	250
Arsenico	microngrammi/l As	50
Cadmio	microngrammi/l Cd	5
Cromo totale	microngrammi/l Cr	50
Piombo	microngrammi/l Pb	50
Selenio	microngrammi/l Se	10
Mercurio	microngrammi/l Hg	1
Amianto	Mg/l	30
COD	Mg/l	30
PH		5,5 < > 12,0

Tabella 2. 2: Concentrazioni limite di alcuni elementi e composti chimici

Il D.M. 5/04/06 ha in parte accolto dette critiche, sostituendo il test di cessione “a 16 giorni” con il test riportato nell’appendice A alla norma UNI 10802, secondo la metodica prevista dalla norma: UNI EN 12457-2 [Caratterizzazione dei rifiuti – Lisciviazione - Prova di conformità per la lisciviazione di rifiuti granulari e di fanghi - Parte 2: Prova a singolo stadio, con un rapporto liquido/solido di 10 l/kg, per materiali con particelle di dimensioni minori di 4 mm (con o senza riduzione delle dimensioni)]. Solo nei casi in cui il campione

da analizzare presenti una granulometria molto fine, si deve utilizzare, senza procedere alla fase di sedimentazione naturale, una ultracentrifuga (20000 G) per almeno 10 minuti. Dopo tale fase si potrà procedere alla successiva fase di filtrazione secondo quanto riportato al punto 5.2.2 della norma UNI EN 12457-2. I risultati delle determinazioni analitiche devono essere confrontati con i valori limite Tabella 2. 2.

2.2.6 LA MARCATURA CE DEGLI AGGREGATI RICICLATI E DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO FRESATO

Nella panoramica normativa non si può non ricordare che dal 1 Giugno 2004 in Italia, essendo terminato il periodo transitorio, sono entrate in vigore le norme armonizzate europee attinenti la marcatura CE degli aggregati naturali o riciclati da impiegarsi nel settore delle costruzioni stradali.

La UNI EN 13242 “Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l’impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade” specifica le proprietà di aggregati ottenuti mediante processo naturale o industriale oppure riciclati per materiali non legati e legati con leganti idraulici, per impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade.

La UNI EN 13285 “Miscele non legate” specifica i requisiti per miscele non legate impiegate per la costruzione e la manutenzione di strade ed altre aree soggette a traffico, essa si applica a miscele non legate di aggregati naturali, artificiali e riciclati con dimensioni superiori comprese tra 8 e 80 mm, e dimensione inferiore pari a 0.

La UNI EN 13043 del gennaio 2004 “Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico” specifica le proprietà di aggregati e filler ottenuti da materiali naturali o riciclati, per impiego in miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade e altre aree soggette a traffico. Tale norma espressamente non si applica all’impiego di conglomerati bituminosi fresati.

Infine la UNI EN 12620 “Aggregati per calcestruzzo” specifica le proprietà degli aggregati e dei filler ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali o riciclati miscelati per essere utilizzati nella confezione di calcestruzzi destinati alle pavimentazioni

stradali oltre che alla produzione di prefabbricati. In tutti i casi, indipendentemente dall'impiego finale, si fa esplicito riferimento all'utilizzo di materiali "riciclati".

Le nuove norme europee sugli aggregati occupandosi di aggregati naturali, artificiali e riciclati (esclusi quelli fresati), individuano un campo di applicazione più ampio di quello trattato dalla normativa italiana. Esse stabiliscono inoltre una metodologia di classificazione degli aggregati comune a tutti i paesi della UE in base alla quale è possibile, mediante verifica della costanza del prodotto, apporre il marchio CE.

Dal punto di vista del riciclo l'entrata in vigore della nuova normativa europea segna una svolta, in quanto definisce la classificazione dei materiali da costruzione per opere stradali non più in funzione dell'origine ma in funzione delle prestazioni tecniche che possono offrire. Si determina in questo modo un primo reale passaggio da normative e capitolati puramente prescritzionali a normative con un approccio realmente prestazionale.

Un discorso a parte deve essere fatto relativamente all'utilizzo del fresato proveniente dalla manutenzione di pavimentazioni flessibili esistenti. Nel settembre 2005 con l'approvazione alla votazione finale si è concluso l'iter per la marcatura CE per i conglomerati bituminosi. Queste nuove serie di norme sono state "costruite" partendo dalla funzione e dalle prestazioni che i materiali devono fornire in opera e non sulla base dei materiali costituenti. La serie di norme EN 13108 è stata sviluppata dal Comitato Tecnico CEN/TC 227 "Materiali stradali" e in Italia sono cogenti da marzo 2008.

Tra esse, di sicuro interesse per il mercato italiano sono:

- EN 13108-1: Miscele bituminose - Specifiche del materiale - Parte 1:
Conglomerato bituminoso prodotto a caldo;
- EN 13108-5: Miscele bituminose - Specifiche del materiale - Parte 5:
Conglomerato bituminoso antisdrucchiolo chiuso;

- EN 13108-7: Miscele bituminose - Specifiche del materiale - Parte 7: Conglomerato bituminoso ad elevato tenore di vuoti;
- UNI EN 13108-8: Miscele bituminose – Specifiche del materiale - Parte 8: Conglomerato bituminoso di recupero.

In particolare, questa ultima norma, pur non ricadendo sotto il mandato M/124 della Comunità Europea, fornisce delle importanti indicazioni sulla classificazione del materiale fresato anche in relazione alla norma EN 13043 per un suo riutilizzo nei conglomerati bituminosi di nuova produzione. A seguito dell'entrata in vigore di tale pacchetto normativo la marcatura CE dei conglomerati bituminosi è regolamentata dalla norma “UNI EN 21 - Miscele bituminose - Specifiche del materiale – Parte 21: Controllo di produzione di fabbrica” che prevede quale sistema di attestazione il 2+, finalizzato ad un uso del materiale dove si richiedono elevati requisiti di sicurezza: il produttore per apporre il marchio CE sopra i suoi prodotti non è soggetto solamente ai compiti di controllo, durante la produzione, dei valori dei requisiti rispetto a quelli delle prove iniziali di tipo, ma necessita anche di un certificato rilasciato da un organismo notificato che verifichi il processo produttivo e convalidi quanto dichiarato dal produttore mediante ispezione iniziale della fabbrica, sorveglianza, valutazione ed approvazione continua del controllo di produzione in fabbrica.

2.2.7 TESTO UNICO SULL'AMBIENTE – DECRETO LEGISLATIVO 3 APRILE 2006, N. 152, RECANTE NORME IN MATERIA AMBIENTALE.

La commissione incaricata dal Ministro dell'Ambiente incaricata di predisporre i decreti attuativi della Legge n.308 del 15 dicembre 2004 “Delega al Governo per il riordino, il coordinamento e l'integrazione della legislazione in materia ambientale e misure di diretta applicazione” ha recentemente concluso i suoi lavori. La "relazione illustrativa” che accompagna il testo evidenzia un intento che si traduce nell'adozione di particolari “strategie” quali:

- l'accorpamento delle disposizioni concernenti settori omogenei di disciplina
- l'integrazione dei vari disposti normativi della pluralità di previsioni precedentemente disseminate in testi eterogenei, così riducendo la stratificazione normativa
- l'abrogazione espressa delle disposizioni non più in vigore

Il testo si componeva di 318 articoli (cui vanno aggiunti gli allegati) e, con le modifiche successivamente apportate, risulta così articolato:

- la parte prima contiene disposizioni comuni e principi generali;
- la parte seconda disciplina le procedure per la valutazione ambientale strategica (VAS), per la valutazione di impatto ambientale (VIA) e per l'autorizzazione integrata ambientale (IPPC);
- la parte terza riguarda la difesa del suolo e la lotta alla desertificazione, la tutela delle acque dall'inquinamento e la gestione delle risorse idriche;
- la parte quarta tratta la gestione di rifiuti e la bonifica dei siti contaminati;
- la parte sesta dispone sulla tutela risarcitoria contro i danni all'ambiente.

Le finalità del decreto sono indicate nell'art. 21 nella "promozione dei livelli di qualità della vita umana, da realizzarsi attraverso la salvaguardia ed il miglioramento delle condizioni dell'ambiente e l'utilizzazione accorta e razionale delle risorse naturali". Il principio dell'azione ambientale è contemplato dall'articolo 3 ter, ove è stabilito che la tutela dell'ambiente, degli ecosistemi naturali e del patrimonio culturale deve essere garantita, da tutti gli enti pubblici e privati e dalle persone fisiche e giuridiche pubbliche o private, mediante un'adeguata azione informata ai principi che, ai sensi dell'articolo 174 2, del Trattato dell'Unione Europea, regolano la politica della comunità in materia ambientale: principio della precauzione, dell'azione preventiva, della correzione, in via prioritaria alla fonte, dei danni causati all'ambiente: "chi inquina paga". Il principio dello sviluppo sostenibile, cui dovrebbe informarsi l'attività dei singoli e della pubblica amministrazione, è fissato dall'articolo 3 quater. Il nuovo "Testo Unico sull'Ambiente" è diventato definitivamente operativo con il Decreto Legislativo 3 aprile 2006 "Norme in materia ambientale" pubblicato sul S.O. 96/L alla Gazzetta Ufficiale n°88 del 14/04/2006.

Per quanto riguarda la Parte IV "Gestione dei rifiuti e bonifica dei siti contaminati" la nuova legge, in conformità con quanto stabilito dalla normativa comunitaria, accorpa tutte le disposizioni emanate successivamente al Decreto Ronchi (DLgs 22/1997). Le principali novità introdotte sono di seguito riportate:

- 1) Integrazione della disciplina contenuta nell'articolato con le altre parti del decreto nonché con gli ulteriori provvedimenti di recepimento delle direttive comunitarie in materia;
- 2) Individuazione ed abrogazione delle disposizioni incompatibili e definizione di una disciplina transitoria
- 3) Revisione della disciplina delle bonifiche;

- 4) Ridefinizione delle priorità nella gestione dei rifiuti in conformità a quelle stabilite dalla normativa comunitaria, senza porre gradi di gerarchia fra il recupero di materie prime secondarie ed il recupero energetico;
- 5) Introduzione della possibilità di stipulare accordi di programma, ai fini di assicurare il controllo sui rifiuti dal momento della loro produzione sino alla relativa trasformazione in materia prima secondaria;
- 6) Miglioramento della definizione di deposito temporaneo, chiarendo definitivamente l'alternatività della disciplina a livello temporale e quantitativo, già presente dalla normativa vigente;
- 7) Introduzione di una disciplina specifica sulla terra e roccia da scavo e sui materiali edilizi inerti non inquinanti;
- 8) Revisione della disciplina in materia di catasto dei rifiuti e di trasporto, prevedendo la soppressione dell'obbligo di denuncia al catasto per i produttori di rifiuti non pericolosi industriali, commerciali e artigianali;
- 9) Ridefinizione dell'organizzazione del servizio di gestione dei rifiuti per Ambiti territoriali ottimali, individuati dalle Regioni;
- 10) Previsione della gestione associata delle funzioni degli enti locali ricadenti nel medesimo Ambito territoriale ottimale, mediante l'istituzione di appositi enti;
- 11) Definizione delle modalità di affidamento del servizio;
- 12) Previsione di una Autorità di vigilanza sulle risorse idriche e sui rifiuti, con il compito di assicurare l'osservanza delle disposizioni in materia. L'Autorità è articolata in due sezioni, una proposta alla vigilanza sul settore idrico, l'altra alla vigilanza su quello dei rifiuti; essa assorbe anche le funzioni del Comitato di vigilanza sull'uso delle risorse idriche e dell'Osservatorio nazionale sui rifiuti che divengono sostanzialmente le due sezioni operative dell'Autorità;

- 13) Razionalizzazione delle discipline in maniera di autorizzazioni;
- 14) Adeguamento della disciplina sulla gestione degli imballaggi alle direttive comunitarie;
- 15) Complessiva rivisitazione della tariffa per la gestione dei rifiuti urbani;
- 16) Aggiornamento e rivisitazione dell'apparato sanzionatorio.

È prevista una modifica della tariffa per la gestione dei rifiuti urbani ed un meccanismo premiale per le imprese virtuose. La legge riorganizza la disciplina dei consorzi di raccolta attraverso l'introduzione di istituti che assicurino la massima concorrenzialità nella gestione del sistema e consente di costituire nuovi consorzi di filiera.

Per il settore delle opere infrastrutturali, è interessante la parte che riguarda la classificazione dei rifiuti. Il nuovo Testo Unico stabilisce che le materie prime seconde, se hanno fin dall'inizio le caratteristiche che le qualificano come tali, non sono mai soggette al regime dei rifiuti. Il testo rimanda ad un successivo regolamento che fissi le caratteristiche delle materie prime seconde e stabilisce che, nel frattempo, si applicano il DM 5 febbraio 1998 e il DM 12 giugno 2002 n. 161, relativi ai rifiuti non pericolosi e pericolosi. Il Testo Unico introduce la nozione di "sottoprodotto": si tratta di materiali che pur non essendo il prodotto principale del ciclo produttivo, non sono residui ma prodotti secondari (art. 183). Relativamente alle terre e rocce da scavo (art. 186), il nuovo Codice, proseguendo sulla strada già tracciata dalla Legge 443 del 2001, stabilisce i requisiti in base ai quali tali materiali non sono classificati come rifiuti e non sottostanno quindi alla disciplina del decreto Ronchi. Si fa notare che, in tema di codici CER, il D.M. 2 maggio 2006 (Supplemento ordinario n.123 alla Gazzetta Ufficiale 18 maggio 2006 n.114) reca - all'allegato C - uno schema di trasposizione dei codici CER individuati nell'Allegato 1, sub-allegato 1 e nell'Allegato 2, del decreto ministeriale 5 febbraio 1998 con i

corrispondenti codici dell'Elenco Dei Rifiuti di cui all'allegato D, parte IV del Dlgs 152/2006 ai sensi della decisione 2000/532/Ce e successive modificazioni.

2.2.8 IL PASSAGGIO DAL MUD AL SISTRI

Il D. Lgs. 152/2006 ha comunque delineato e definito il superamento dell'attuale sistema di contabilizzazione dei rifiuti speciali ma, con il Decreto ministeriale del 17 dicembre 2009, pubblicato nella G.U. del 13 gennaio 2010 ed entrato in vigore il giorno successivo, è stato introdotto il Sistema di controllo della tracciabilità dei rifiuti (SISTRI), che ha come obiettivo la totale informatizzazione della filiera dei rifiuti speciali. L'entrata in vigore del Sistri ha visto tre proroghe, un'abrogazione e la sua reintroduzione, avvenuta il 14 settembre 2011, quando il Parlamento ha licenziato e quindi emanato il decreto legge 138/2011, convertito in legge 148/2011.

In particolare l'art. 6 del DL 138/2011 prevede:

- fino al 15 dicembre 2011 la verifica tecnica delle componenti software e hardware del sistema Sistri, anche ai fini dell'eventuale implementazione di tecnologie di utilizzo più semplice, rispetto a quelle attualmente previste, organizzando, in collaborazione con le associazioni di categoria maggiormente rappresentative, il test di funzionamento con l'obiettivo della più ampia partecipazione degli utenti;
- l'avvio del Sistri, per le imprese che hanno fino a dieci dipendenti ad una data non antecedente il 1° giugno 2012. A tale riguardo il Ministero dell'Ambiente deve ancora definire la data in questione;
- dal 9 febbraio 2012 l'avvio del Sistri per le imprese e gli enti produttori di rifiuti speciali pericolosi e/o non pericolosi che hanno più di dieci dipendenti, per le imprese che effettuano il trasporto dei rifiuti, per gli intermediari e i commercianti di rifiuti e per le imprese che effettuano operazioni di recupero e smaltimento dei rifiuti (in pratica tutti i gestori di rifiuti);

- entro il 15 dicembre 2011, l’emanazione di un decreto ministeriale, nel quale dovranno essere individuate specifiche tipologie di rifiuti, per le quali, in considerazione della quantità e dell’assenza di specifiche caratteristiche di “criticità ambientale”, potrà continuare l’attuale gestione amministrativa e quindi non saranno vincolate all’utilizzo del programma informatizzato del Sistri. Questo significa che potranno continuare con l’attuale registro di carico e scarico dei rifiuti, l’utilizzo del formulario per la fase del trasporto dei rifiuti, quando smaltiti o avviati al recupero, e la presentazione del MUD entro il 30 aprile di ogni anno;
- - che gli enti e le imprese che producono esclusivamente rifiuti soggetti al ritiro obbligatorio da parte di sistemi di gestione regolati per legge possano delegare gli adempimenti relativi al Sistri ai consorzi di recupero (sistema CONAI, COBAT, Consorzi pneumatici, RAEE, Polieco, ecc.).

2.2.9 DECRETO LEGISLATIVO 16 GENNAIO 2008, N. 4 “ULTERIORI DISPOSIZIONI CORRETTIVE ED INTEGRATIVE DEL DECRETO LEGISLATIVO 3 APRILE 2006, N.152, RECANTE NORME IN MATERIA AMBIENTALE”.

Il decreto, nel rivisitare completamente la materia in tema di VIA e VAS, apporto sostanziali modifiche alla disciplina delle acque ed a quella, che qui interessa particolarmente, sui rifiuti, ponendo rimedio a non pochi errori ed incongruenze del testo originario. Vengono indicati i criteri di priorità nella gestione dei rifiuti, promuovendo anche la prevenzione e la riduzione della produzione e della nocività dei rifiuti (articoli 178 e 179) con lo scopo evidente di limitare al massimo la loro produzione le conseguenze dello smaltimento, privilegiandone il recupero mediante riciclo, reimpiego, riutilizzo o ogni altra azione finalizzata all'ottenimento di materie prime secondarie che, conseguentemente alle modifiche apportate dal D.L.vo 4/2008 all'articolo 1792, sono adottate con priorità rispetto all'uso dei rifiuti come fonte di energia, anch'esso contemplato della disposizione citata. Tenendo conto del disposto degli articoli illustrati in precedenza, appare di tutta evidenza che la gestione dei rifiuti viene disciplinata in modo tale da privilegiare il recupero e limitare il più possibile lo smaltimento.

L'art. 181 (oggetto di intervento con il correttivo del 2008) prevede, dunque, che le autorità competenti favoriscano il recupero mediante:

- attività di riutilizzo, il riciclo o le altre forme di recupero dei rifiuti;
- l'adozione di misure economiche e la determinazione di condizioni di appalto che prevedano l'impiego dei materiali recuperati dai rifiuti al fine di favorire il mercato dei materiali medesimi;
- l'utilizzazione dei rifiuti come combustibile o come altro mezzo per produrre energia;

- la promozione di analisi dei cicli di vita dei prodotti ecobilanci, informazioni;

L'ultimo comma dell'articolo 181 indica chiaramente che la disciplina in materia di gestione dei rifiuti si applica fino al completamento delle operazioni di recupero, al termine del quale sono da considerarsi materiali diversi. Con il D.L.vo 4/2008 è stato inoltre introdotto l'articolo 181 bis che disciplina materie, sostanze e prodotti secondari. Tali materie non rientrano nella categoria dei rifiuti a condizione che rispettino i seguenti criteri, requisiti e condizioni:

- a) siano prodotti da un'operazione di riutilizzo, di riciclo o di recupero di rifiuti;
- b) siano individuate la provenienza, la tipologia e le caratteristiche dei rifiuti dai quali si possono produrre;
- c) siano individuate le operazioni di riutilizzo, di riciclo o di recupero che le producono, con particolare riferimento alle modalità ed alle condizioni di esercizio delle stesse;
- d) siano precisati i criteri di qualità ambientale, i requisiti merceologici e le altre condizioni necessarie per l'immissione in commercio, quali norme e standard tecnici richiesti per l'utilizzo, tenendo conto del possibile rischio di danni all'ambiente e alla salute derivanti dall'utilizzo o dal trasporto del materiale, della sostanza o del prodotto secondario;
- e) abbiano un effettivo valore economico di scambio sul mercato.

Pur in presenza delle modifiche apportate permane la necessaria sussistenza dell'ulteriore condizione che i detentori di detti materiali non se ne disfino o non abbiano deciso o non abbiano l'obbligo di disfarsene trattandosi, in questo caso, di azioni che qualificano il materiale medesimo come rifiuto. Per quanto riguarda invece lo smaltimento, l'art. 182 ne evidenzia la natura di fase residuale dell'attività di gestione indicando i criteri generali cui attenersi.

Si rileva così che lo smaltimento deve essere effettuato:

- in condizioni di sicurezza;
- quando si sia verificata l'impossibilità tecnica ed economica di procedere al recupero;
- riducendo il più possibile, sia in massa che in volume, i rifiuti da avviare allo smaltimento finale potenziando la prevenzione e le attività di riutilizzo, di riciclaggio e di recupero;
- ricorrendo ad una rete integrata ed adeguata di impianti di smaltimento, attraverso le migliori tecniche disponibili e tenuto conto del rapporto tra i costi e i benefici complessivi. Il sistema, così delineato, segui principi di autosufficienza attraverso lo smaltimento dei rifiuti urbani non pericolosi in ambiti territoriali ottimali; prossimità, attraverso l'utilizzazione degli impianti al luogo di produzione o raccolta dei rifiuti per limitarne i movimenti sul territorio e protezione dell'ambiente e della salute mediante il ricorso a tecnologie adeguate;
- gettando lo smaltimento dei rifiuti urbani non pericolosi in regioni diverse da quelle dove gli stessi sono prodotti, salvo casi particolari;

Complementare alla nozione di rifiuto è quella di “ sottoprodotto” contenuta nella lettera p) dell’art. 183, precedentemente non contemplata dal D.L.vo 4/2008. Nella relazione illustrativa che accompagnava il testo del 2006 specificato che la definizione di "sottoprodotto" veniva adottata in conformità ad una serie di sentenze comunitarie. La definizione originario di sottoprodotto, già contenuta nell'articolo 183 lettera n), è stata completamente rivisitata nel nuovo testo introdotto nel 2008. Si legge ora, nell'articolo 183 lettera p) che sono sottoprodotti "le sostanze ed i materiali dei quali il produttore non intende disfarsi ai sensi dell'articolo 1831, lettera a)".

I sottoprodotti devono inoltre soddisfare tutti seguenti criteri, requisiti e condizioni:

- 1) siano originati da un processo non direttamente destinato alla loro produzione;
- 2) il loro reimpiego sia certo, sin dalla fase della produzione, integrale e avvenga direttamente nel corso del processo di produzione o di utilizzazione preventivamente individuato e definito;
- 3) soddisfino requisiti merceologici e di qualità ambientale idonei a garantire che il loro impiego non dia luogo ad immissioni e ad impatti ambientali qualitativamente e quantitativamente diversi da quelli autorizzati per l'impianto dove sono destinati ad essere utilizzati;
- 4) non debbano essere sottoposti a trattamenti preventivi o a trasformazioni preliminari per soddisfare i requisiti merceologici e di qualità ambientale di cui al punto 3), ma posseggano tali requisiti sin dalla fase della produzione;
- 5) abbiano un valore economico di mercato.

La sussistenza delle condizioni indicate deve essere contestuale e, anche in mancanza di uno solo di essi, il residuo rimarrà soggetto alle disposizioni sui rifiuti.

2.2.10 PNEUMATICI DISMESSI

Il D.Lgs. n. 36 del 13/01/2003 “attuazione della direttiva 99/31/CE” con l’Art.6 ha bandito, a partire dal 16 luglio 2003, il conferimento in discarica dei pneumatici tal quali mentre, a partire dal 16 luglio 2006, ne esclude il conferimento anche in forma triturrata decretando in questo modo la necessità di attuare concretamente forme idonee di trattamento e recupero dei pneumatici a fine vita.

La gestione degli pneumatici fuori uso è disciplinata dall'articolo 228 il quale richiama le disposizioni speciali in materia di veicoli fuori uso (D.L.vo 209/2003) e quelle generali di cui agli articoli 179 e 180 allo scopo di ottimizzarne il recupero e per ridurne la formazione anche attraverso la ricostruzione.

Per far ciò, il primo comma obbliga produttori e importatori a provvedere alla gestione di quantitativi di pneumatici fuori uso pari a quelli da loro immessi sul mercato e destinati alla vendita sul territorio nazionale. L'onere derivante dall'obbligo suddetto grava in parte, come sancito dal comma secondo, anche sull'utente finale, il quale è tenuto a versare un contributo il cui importo dovrà essere indicato in fattura in tutte le fasi della commercializzazione.

Diversamente da quanto indicato nell'originaria indicazione del D.L.vo 22/1997, la nozione di rifiuti è attualmente ristretta ai soli pneumatici "fuori uso" (voce 16.01.03 dell'Elenco dei rifiuti), che il recente Decreto Ministeriale 11 aprile 2011, n. 82 recante “Regolamento per la gestione degli pneumatici fuori uso (PFU), ai sensi dell'articolo 228 del D.L.vo 3/04/06, n.152 e successive modificazioni e integrazioni, recante disposizioni in materia ambientale”, in vigore dal 7/06/11, individua negli *"pneumatici, rimossi dal loro impiego a qualunque punto della loro vita, dei quali il detentore si disfi, abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi e che non sono fatti oggetto di ricostruzione o di successivo*

riutilizzo". Si precisa che "(...) esulano dalla nozione di rifiuto solo i materiali residuali di produzione o di consumo che siano effettivamente riutilizzati senza subire alcun trattamento preventivo, ovvero subendo un trattamento preventivo che non importi un operazione di recupero" (così Cass. Sez. III n.46643 del 14 dicembre 2007, Messina).

2.3 INCENTIVI AL RECUPERO

2.3.1 LE DISPOSIZIONI CONTENUTE NELLA LEGGE 448/2001

La finanziaria del 2002 (Legge 448/2001) ha introdotto nell'ordinamento una disposizione che impone alle Pubbliche Amministrazioni ed alle società a prevalente capitale pubblico di coprire il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo. L'articolato di legge collega l'attuazione dell'obbligo all'emanazione di disposizioni tecniche che sono contenute nel decreto del Ministero dell'Ambiente n. 203 dell'8 maggio 2003.

2.3.2 DECRETO DEL MINISTRO DELL'AMBIENTE 203/2003 (REPERTORIO DI RICICLAGGIO)

L'art. 3, comma 3 del DM 203/2003 ha ampliato lo spettro di applicazione della norma contenuta nella legge finanziaria del 2002 estendendo l'obbligo a tutti i settori della pubblica amministrazione e quindi anche alle opere pubbliche. In conseguenza di ciò, ogni Pubblica Amministrazione si è trovata nell'obbligo di inserire nei propri capitolati d'appalto la necessità di prevedere l'impiego di materiali riciclati.

Il decreto stabilisce le metodologie di calcolo e la definizione di materiale riciclato, ed individua più precisamente le finalità ed i destinatari. Viene istituito il Repertorio del Riciclaggio, che è un elenco di prodotti realizzati con materiale riciclato a cui le pubbliche amministrazioni possono attingere per adempiere all'obbligo di soddisfare almeno il 30% del proprio fabbisogno. Vi sono indicate, distintamente per ogni prodotto o manufatto, le condizioni di offerta, la disponibilità e la congruità del prezzo.

Il Repertorio del Riciclaggio è gestito dall'Osservatorio Nazionale dei Rifiuti (ente di controllo presso il Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio).

Il decreto stabilisce le procedure da seguire per ottenere l'iscrizione dei prodotti nel Repertorio, orientate alla qualificazione del prodotto, che deve garantire livelli di qualità e di sicurezza ambientale idonei ai diversi impieghi ai quali può essere destinato.

L'iscrizione al repertorio di un prodotto avviene sulla base di una domanda che l'azienda produttrice invia all'Osservatorio, corredata da documentazione tecnica specifica per ogni settore e dai seguenti dati:

- codici dell'elenco europeo dei rifiuti con il quale viene realizzato il materiale o il manufatto;

- la percentuale di rifiuti nel materiale riciclato, che dovrà rispettare i limiti stabiliti in apposite circolari;
- un Tecnico responsabile;
- una relazione tecnica indicante le eventuali differenze prestazionali tra il bene o il manufatto in materiale riciclato e analogo bene o manufatto realizzato con materiale vergine, evidenziando la conformità qualitativa del prodotto.

É stato necessario elaborare, per ciascun settore applicativo, alcune disposizioni di riferimento che tengano conto delle condizioni tecniche specifiche di utilizzo. Tali disposizioni sono rese note con Circolari emanate dal Ministero dell’Ambiente. Vi debbono essere dettagliate le condizioni particolari di iscrिवibilità nel Repertorio del Riciclaggio e le condizioni minime che permettono di rispettare i seguenti requisiti: limite, in termine di peso, di rifiuti nel materiale riciclato. L’imposizione riguarda in linea generale sia il limite minimo sia il limite massimo, il primo volto a garantire un beneficio sensibile rispetto alla riduzione del prelievo di materiale vergine e dei conferimenti a discarica, il secondo traduce considerazioni di opportunità e di cautela rispetto alla qualità dei beni ed al buon esito delle costruzioni realizzate con materiali riciclati. Le circolari applicative già emanate che possono avere interesse per il settore stradale sono le seguenti:

- plastica (circ. 04/08/2004 pubblicata sulla GU n. 191 del 2004);
- rifiuti inorganici da demolizione e manutenzione, nonché conglomerato bituminoso da scarifica (circ.5205 del 15/07/05 pubblicata sulla GU n.171 del 25/07/05);
- articoli in gomma (circ. 19/07/2005).

La seconda in elenco riguarda la stragrande maggioranza delle applicazioni, mentre il recupero di plastica e gomma ha costituito finora quasi solamente un argomento di ricerca e sperimentazione.

2.3.3 CIRCOLARE N. 5205 DEL 15 LUGLIO 2005, PUBBLICATA IN GU N. 171 DEL 2005

La Circolare n. 5205 è intitolata “Indicazioni per l’operatività nel settore edile, stradale e ambientale, ai sensi del D.M. 203/2003” e costituisce un riferimento di carattere generale per tali settori, in quanto prevede che le due famiglie di materiali ivi esplicitamente individuate (rifiuti inorganici post-consumo derivanti da demolizione e manutenzione di opere edili ed infrastrutturali, nonché conglomerato bituminoso post-consumo ottenuto da scarifica di pavimentazioni stradali) non siano le sole iscrivibili nel Repertorio.

A differenza di quanto attiene la prima famiglia di materiali cui è rivolta la norma, per il conglomerato bituminoso ottenuto da scarifica di pavimentazioni stradali la circolare non è altrettanto dettagliata, ma può individuarsi sostanzialmente la destinazione d’impiego (categoria di prodotto) di aggregato per conglomerati bituminosi (da presumersi, per l’assenza di disposizioni contrarie, sia a caldo, sia a freddo).

É indicato solamente il limite minimo in peso, che, allo stato attuale della tecnologia è fissato nel 20%. Il limite massimo non è fissato, poiché è dipendente dai requisiti prestazionali richiesti alle varie miscele e rapidamente variabile in relazione ai progressi nelle tecniche e nei macchinari.

2.3.4 CIRCOLARE DEL 19 LUGLIO 2005, PUBBLICATA IN GU N.173 DEL 27 LUGLIO 2005

Questa circolare ha individuato prescrizioni e requisiti per rendere operativo l'impiego di beni e manufatti ottenuti con materiale riciclato da rifiuti in gomma nei settori dell'edilizia, dell'arredo urbano e stradale, dell'infrastruttura viaria, tranviaria e portuale e dei prodotti per opere di ingegneria civile.

Per quanto riguarda i materiali, i manufatti ed i prodotti ottenuti dalle attività di recupero di articoli in gomma, la circolare in oggetto ne individua un cospicuo gruppo.

Tra questi, di particolare interesse per il settore delle infrastrutture viarie, sono:

- Conglomerati cementizi modificati con granulo di gomma;
- Conglomerati bituminosi con granulo di gomma (tecnica dry)
- Bitumi modificati con polverino di gomma (tecnica wet);
- Barriere stradali, spartitraffico, attenuatori d'urto ad assorbimento;
- Barriere antirumore e/o fonoassorbenti;

Si tratta di materiali, manufatti e beni riciclati eterogenei che comprendono una casistica molto ampia, tanto da condizionare la stessa possibilità di definire un criterio specifico per ciascuna di esse per determinare il limite in peso dei rifiuti utilizzati per la produzione. Al fine di agevolare il compito del tecnico e dell'impresa la circolare individua a titolo esemplificativo alcuni limiti minimi relativi alla percentuale di rifiuto in gomma post-consumo sul totale del materiale:

- Conglomerati cementizi modificati con granulo di gomma = 5%
- Conglomerati bituminosi con granulo di gomma (tecnica dry) = 3%
- Bitumi modificati con polverino di gomma (tecnica wet) = 8%

2.3.5 DISPOSIZIONI REGIONALI, LOCALI E PRASSI APPLICATIVA

Le disposizioni del D.M. 203/2003, non sono da sole sufficienti per conseguire l'obiettivo della quota pari al 30% di materiale riciclato; al contrario richiedono ulteriori e specifiche disposizioni applicative e di dettaglio che, per gli enti regionali, devono essere adottate dalle Regioni (art. 19, comma 4, D.Lgs n. 22/97): *“Le Regioni, sulla base di metodologie di calcolo e della definizione di materiale riciclato stabilite da apposito decreto del Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio, di concerto con i Ministeri delle attività produttive e della salute, sentito il Ministro per gli affari regionali, adottano, entro 60 giorni dalla data di entrata in vigore del suddetto decreto le disposizioni occorrenti affinché gli uffici e gli enti pubblici, e le società a prevalente capitale pubblico, anche di gestione dei servizi, coprano il fabbisogno annuale dei manufatti e beni, indicati nel medesimo decreto, con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo”*.

Ai sensi del comma 3, dell'articolo 3, del DM 203/2003, per rispettare l'obbligo della quota del 30%, tutti i destinatari sono tenuti a inserire delle clausole specifiche o particolari condizioni “in sede di formazione di una gara per la fornitura e l'installazione di manufatti e beni, e nella formulazione di capitolati di opere pubbliche”.

Le circolari N. 5205 del 15 luglio 2005 e 19 luglio 2005 già descritte, precisano che tale obbligo nasce “nel momento in cui i prodotti iscritti al repertorio del riciclaggio presentano contestualmente: medesimo uso, ancorché con aspetto, caratteristiche o ciclo produttivo diversi e prestazioni conformi all'utilizzo cui sono destinati rispetto a quelli realizzati a partire da materiali vergini”.

Quest'ultima rappresenta una condizione *necessaria ma non sufficiente* per gli uffici ed enti regionali e per tutte le società a prevalente capitale pubblico regionale.

Per questi ultimi, infatti, è richiesta una ulteriore condizione rappresentata dall'adozione di apposite disposizione da parte della Regione competente come previsto dall'art. 19, comma 4 del DLgs. 22/97 precedentemente citato.

2.3.6 GLI ACCORDI DI PROGRAMMA

Per promuovere la collaborazione fra pubbliche amministrazioni, soggetti privati ed associazioni di categoria, il “Decreto Ronchi” ha previsto la possibilità che vengano stipulati accordi di programma su base volontaria, che consentono di adeguare l’applicazione delle norme alle specifiche situazioni e condizioni produttive locali. In particolare, gli accordi di programma sono finalizzati:

- alla riduzione della quantità e della pericolosità dei rifiuti, al loro recupero, riutilizzo e riciclaggio ed al conseguimento di livelli ottimali di utenza raggiunta dai servizi di raccolta;
- a favorire il riutilizzo, il riciclaggio ed il recupero dei rifiuti prodotti, con la possibilità di prevedere a questo fine semplificazioni di adempimenti anche amministrativi, nel rispetto dei principi e degli obiettivi stabiliti dalle norme nazionali e comunitarie in materia di rifiuti;
- aumentare la conoscenza del flusso dei rifiuti e di conseguenza il loro controllo;
- promuovere la ricerca, l’innovazione e l’utilizzo di materie prime alternative.

Con riferimento alla realtà della Regione Emilia Romagna, l’Accordo di Programma per il recupero dei residui da costruzione e demolizione della Provincia di Bologna dà concreta attuazione a questi principi e costituisce un valido esempio di questo tipo di disposizioni applicative ma, per non appesantire ulteriormente la panoramica presentata, di per sé già molto complessa, viene tralasciata la sua esposizione.

CAPITOLO 3

RICICLAGGIO DEL FRESATO

3.1 INTRODUZIONE

I materiali non legati (o granulari) delle pavimentazioni flessibili esibiscono un comportamento del tipo carico-dipendente. Ciò significa che, confinati all'interno di uno strato compattato della pavimentazione, le caratteristiche effettive di rigidità aumentano all'aumentare dello stato di sollecitazione. Quando tali materiali sono ripetutamente sottoposti a livelli di sollecitazione che rappresentano una frazione significativa della resistenza ultima, hanno luogo deformazioni da taglio che, accumulandosi, risultano in una deformazione permanente (“rutting”).



Figura 3. 1: Comportamento sotto carico veicolare di materiali legati (sx) e materiali granulari (dx)

L'aggiunta di un agente stabilizzante lega le particelle di materiale le une alle altre, modificando la risposta ai carichi, cosicchè uno strato di materiale legato si comporta in modo molto più simile ad una lastra con modelli di sforzo molto diversi. La fondamentale differenza nella distribuzione degli sforzi tra i materiali non legati e legati (il cono che sorregge il carico e la formazione di sforzi flessionali rispettivamente), è raffigurata nella Figura 3. 1.

La resistenza acquisita è principalmente determinata dalla quantità di sostanza stabilizzante aggiunta, ma allo stesso tempo varia in base al tipo di materiale trattato. Contrariamente a quanto alcuni ritengono, l'aggiunta di una quantità superiore di sostanza stabilizzante allo scopo di ottenere una maggiore resistenza, può ridurre le prestazioni dello strato. E' quindi fondamentale che i requisiti di efficienza dello strato stabilizzato vengano chiaramente indicati e che venga condotto uno studio adeguato delle miscele su campioni rappresentativi allo scopo di determinare il corretto tasso di applicazione.

È importante sottolineare che i conglomerati bituminosi a caldo (o *hot mix asphalt* , HMA) sono fundamentalmente differenti dai materiali stabilizzati a bitume (BSM), nonostante il bitume sia il legante comune ad entrambe le tipologie: un HMA è un materiale legato in modo continuo, ovvero il bitume costituisce una pellicola che ricopre tutte le particelle dell'impasto, senza discontinuità, mentre per un BSM è vero il contrario, laddove il bitume ricopre solo parzialmente gli aggregati.

I materiali stabilizzati a cemento sono a loro volta diversi da quelli stabilizzati a bitume. L'aggiunta di cemento comporta infatti un aumento della rigidità, mentre il bitume promuove una maggiore flessibilità. Oltre ad essere legati senza soluzione di continuità, i materiali stabilizzati con cemento sono soggetti a ritiro, che si manifesta in spaccature a blocchi nello strato, esacerbato dalla ciclicità dei carichi. Come illustrato nella figura soprastante, si sviluppano tensioni di trazione nella porzione inferiore degli strati

legati, all'inflettersi della pavimentazione. Carichi ripetuti (solitamente milioni di cicli) sono causa di danni da fatica, con lesioni che vanno dal basso verso l'alto. Il materiale trattato con una sostanza stabilizzante cementizia tende ad essere mediamente friabile. Aumentare la resistenza del materiale significa renderlo ancora più friabile e perciò lo strato stabilizzato sarà caratterizzato da una diminuzione delle proprie caratteristiche da fatica; in tale situazione, le continue sollecitazioni dovute al carico esercitato dagli automezzi comporteranno inevitabilmente un aumento delle incrinature che, per lo strato di una pavimentazione stradale, rappresentano ovviamente una caratteristica negativa.

Il tipo di legante usato è uno dei fattori determinanti per il numero di cicli di carico che uno strato può sopportare prima che tali lesioni si manifestino. Questo è vero sia per i materiali trattati con cemento che per i conglomerati bituminosi a caldo HMA.

I materiali trattati con bitume, a differenza del cemento, sono invece meno rigidi, ma esibiscono migliore resistenza al taglio. Il principale meccanismo di rottura di tali materiali è la deformazione permanente sotto carico. Sotto una certa percentuale di bitume, variabile dal 3 al 5% in dipendenza degli aggregati e delle loro proprietà, questi materiali non sono soggetti a incrinature da fatica, essendo legati in modo discontinuo.

Quando il materiale viene stabilizzato con il bitume non è soggetto a incrinature da ritiro, tipiche dei materiali trattati con il cemento.

La superficie realizzata con materiale stabilizzato con il bitume può essere immediatamente aperta al traffico, grazie alla legatura iniziale (resistenza) delle particelle in superficie che impediscono lo sfaldamento come conseguenza del passaggio del traffico. Se una superficie stabilizzata con il bitume è correttamente finita può essere usata subito senza particolari problemi. I mezzi pesanti, compresi i rulli compressori, non devono essere parcheggiati sulla superficie completata per almeno una settimana, periodo durante il quale la superficie aumenta la propria resistenza. Il trattamento con il bitume è un metodo

conveniente per aumentare la resistenza di un materiale e per limitare le conseguenze dell'azione dell'acqua. Lo strato realizzato con materiale legato con bitume è flessibile e presenta caratteristiche di resistenza all'usura superiori alla media se paragonato agli strati trattati con sostanze stabilizzanti cementizie che permettono di ridurre lo spessore dello strato senza sacrificare la capacità strutturale.

La ricerca e i test di laboratorio aiutano a creare una matrice bidimensionale che ben rappresenta la connessione tra il comportamento del materiale e il tipo e tenore di legante, come illustrato in Figura 3. 2. Essa aiuta a comprendere i tipici meccanismi di rottura dei materiali riciclati a freddo, inclusi i BSMs.

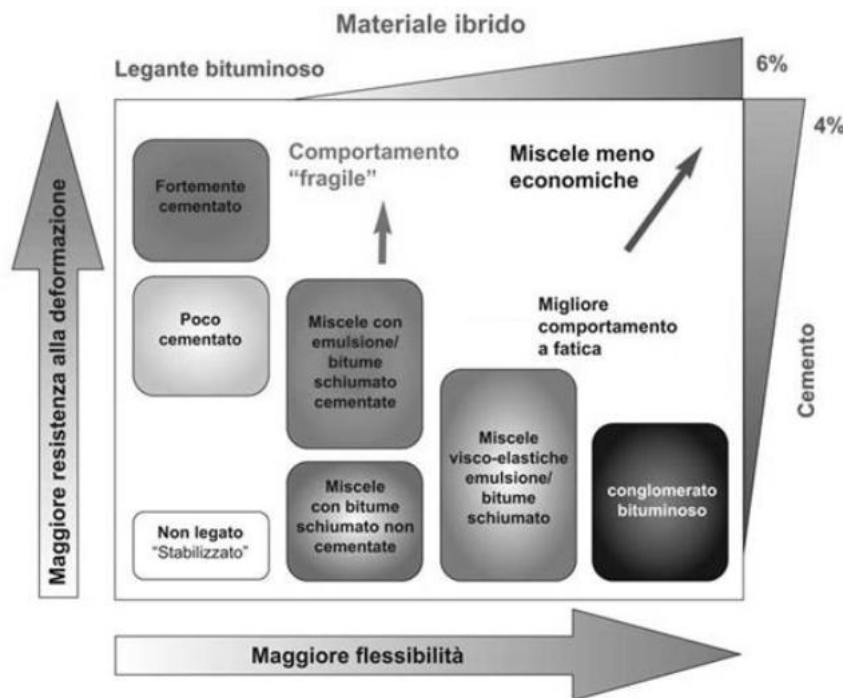


Figura 3. 2: L'influenza dei tenori di legante bituminoso e cemento sul comportamento dei BSM

I materiali riciclati combinano l'influenza degli aggregati minerali, leganti bituminosi, active fillers e acqua per creare complessi materiali visco-elasto-plastici con caratteristiche anisotropiche. La matrice di un BSM è mista, presentando una risposta dipendente dei carichi simile a quella dei materiale granulari (vedi Figura 3. 3) e una

dipendenza dalla frequenza di carico simile all'asfalto (vedi Figura 3. 4) [Jenkins K.J. van de Ven M.F.C., Molenaar A.A.A. and de Groot J.L.A, *Performance Prediction of Cold Foamed Bitumen Mixes*, 2002].

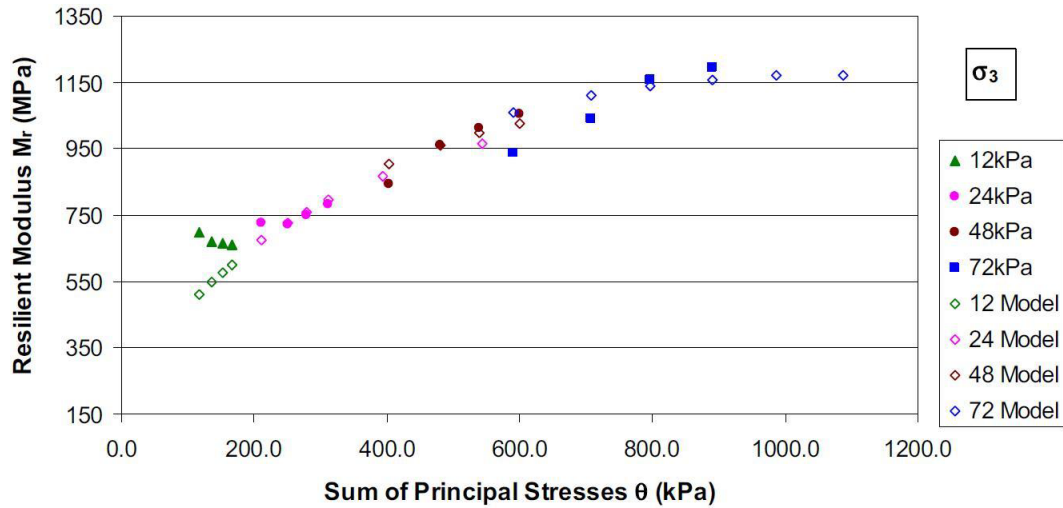


Figura 3. 3: Moduli residenti di miscele di granulati riciclati con 2% di bitume schiumato

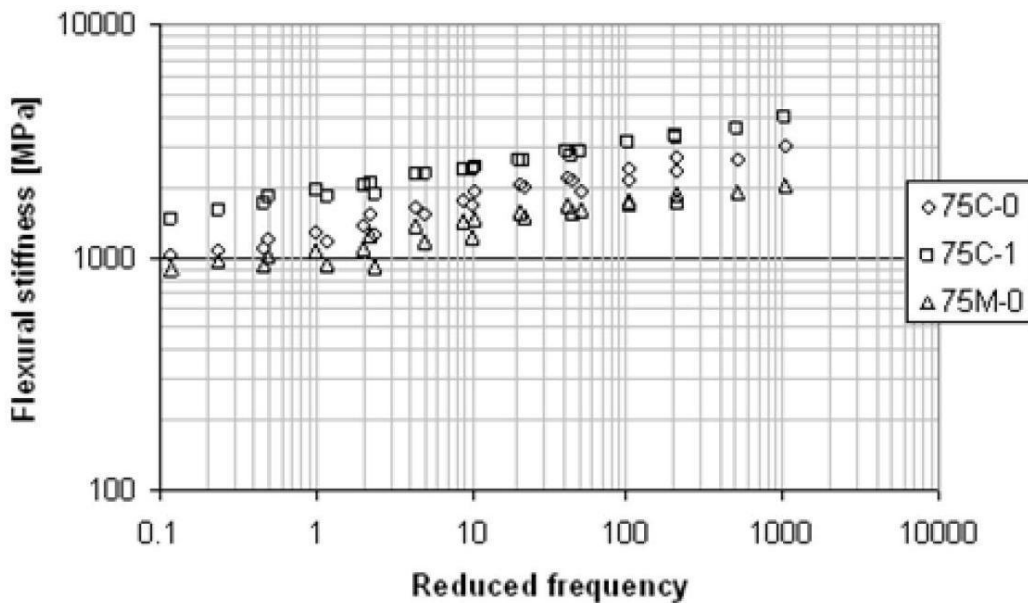


Figura 3. 4: Moduli flessionali di Calcare frantumato e RAP stabilizzati con emulsione, temperatura di riferimento 20 °C.
 Nota: 75C = 75% Crushed Limestone with 25% RAP, 0=no cement, 1 = 1%cement,
 75M-0 = 75% RAP with 25% Crushed Limestone, no cement

3.2 FATTIBILITÀ E SOSTENIBILITÀ DEL RICICLAGGIO

Il dibattito circa l'implementazione di tecniche di riciclaggio freddo per riabilitazione delle strade risulterebbe un esercizio puramente accademico se non fosse per la possibilità effettiva di condurre l'operazione. Creativi progettisti di macchine con ambizione tecnologica hanno reso il dibattito reale. Lo sviluppo di macchinari per il riciclaggio ha preceduto le iniziative degli ingegneri civili praticanti di riciclare effettivamente i materiali stradali esistenti. Le moderne riciclatrici offrono perdita e consumo energetico minimo con miglioramento ottimale delle proprietà di performance del mix. Lo sviluppo di procedure accurate riguardanti il "mix design" e il "pavement design" per materiali riciclati a freddo ad opera di ricercatori ed operatori ha seguito la disponibilità di strumenti di riciclaggio. La Figura 3.5 testimonia il trend globale di investimento nel settore delle riciclatrici a freddo capaci di interventi di stabilizzazione a base di cemento, emulsione o bitume schiumato.

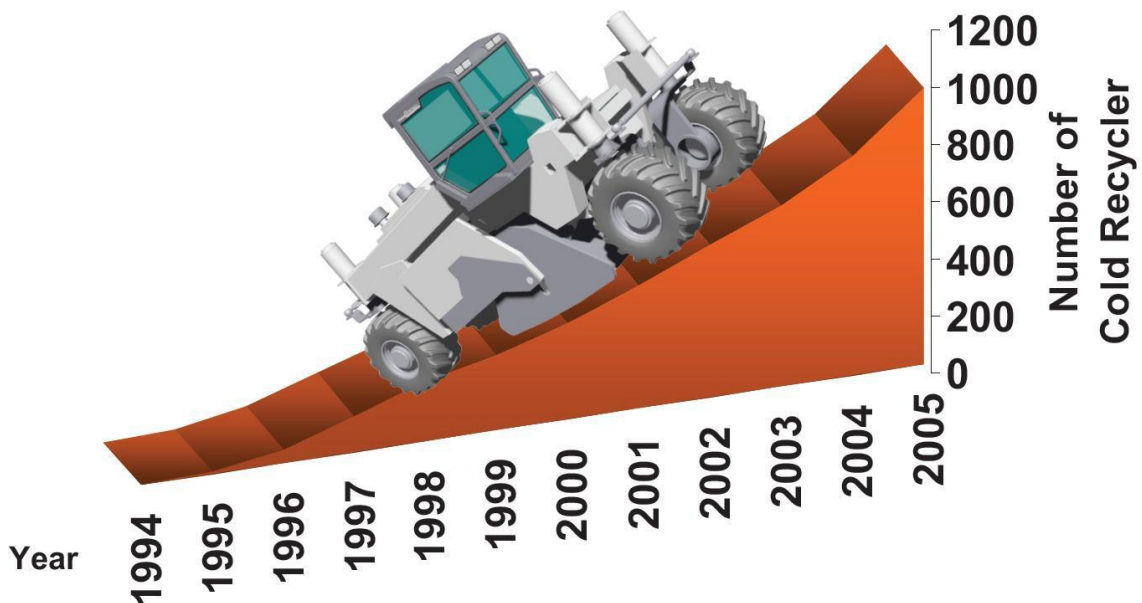


Figura 3. 5: Crescita globale di riciclatrici a freddo per singola marca e singolo modello

Il trend di investimento globale nelle riciclatrici a freddo si riferisce a singola marca e modello ed escludere altri apparecchi ausiliari come:

- Fresatrici a freddo che producono RAP (reclaimed asphalt pavement) adatto al riciclaggio freddo,
- Rimescolatrici a freddo in plant, che incorpora usualmente un doppio tamburo di shaft pugmill mixers e può aggiungere di bitume schiumato o l'emulsione alla miscela,
- Stabilizzatrici a freddo (per sottofondi) e riciclatrici (registratori della pavimentazione) di differenti marchi e modelli

L'incremento del numero di tutte le attrezzature suddette ha seguito una crescita esponenziale durante gli ultimi 15 anni. Le ragioni di tali investimenti includono:

- Controllo Qualità: un microprocessore di bordo controlla i tassi di applicazione di umidità e stabilizzanti molto più accuratamente delle attrezzature convenzionali. Questo riduce la variabilità del prodotto finale;
- Controllo Quota: l'impatto dello spessore dello strato sulla performance della pavimentazione è elevato. La profondità di trattamento controllata da sistemi laser assicura che il controllo dello spessore sia mantenuto nell'ordine dei millimetri;
- Rapidità di Trattamento: il processo a passata singola migliora i tempi dell'operazione consentendo grandi benefici agli stabilizzanti a base di cemento che sperimentano presto l'azione pozzolanica . Questi benefici si traducono in un miglioramento dal 15% al 40% della resistenza dei materiali (Jenkins, 1994);

- Versatilità con diversi tipi di agenti stabilizzanti: il processo di riciclaggio *in situ* consente l'uso di entrambi gli agenti stabilizzanti a base di cemento e bitume, permettendo parimenti la creazione di strati di pavimentazione flessibili e rigidi durante la riabilitazione della strada. In particolare, questo ha creato enormi opportunità per la tecnologie con bitume schiumato ed emulsione, che sono state adattate all'uso per il riciclaggio in situ.

Affianco ai benefici tecnici del riciclaggio freddo, ci sono altri vantaggi che hanno reso tale tecnologia attrattiva per il settore stradale, alcuni dei quali sono qui riassunti:

- Ambientali
 - Ridotta o nulla perdita di materiale della pavimentazione esistente, con percentuale di riutilizzo molto alta;
 - Non è richiesta energia nel riscaldamento o asciugatura dei materiali prima del trattamento;
 - Minima produzione di emissione per la produzione di miscele a freddo o stabilizzazione in relazione al HMA o riciclaggio a caldo. Sono possibili riduzioni fino al 45% in CO₂ e SO₂ e 60% in NO_x per miscele con temperature più basse di 38 °C (Hurley and Prowell, 2006).
- Sociali
 - Materiali stabilizzati a bitume (BMS) con bitume schiumato o emulsione di bitume quale legante possono essere stoccati e usati per lavori di manutenzione e migliorie;
 - Le condizioni di salute e sicurezza dei lavoratori sono migliori rispetto al HMA

- Il trattamento a passata singola durante il riciclaggio a freddo sul posto (CIR-Cold In Place Recycling) minimizza i conflitti dell'impianto con il traffico durante i lavori di riabilitazione, migliorando la sicurezza pubblica
- Economici
 - L'attrezzatura consente trattamenti più profondi degli strati in situ, riducendo lo spessore degli strati di usura
 - Il processo CIR consente la chiusura della corsia singola
 - Il processo CIR permette una veloce interruzione delle operazioni di riciclaggio in avverse condizioni meteorologiche, minimizzando il rischio dovuti all'umidità o la necessità di un ritrattamento

Il successo di ogni tecnologia richiede che la stessa sia economicamente percorribile. Il progresso nello sviluppo e implementazione del riciclaggio in progetti svolti in Sudafrica è illustrato in Figura 3. 6 [Collings D.C., 2001; Jenkins K.J., 1994], dove sono riassunti progetti di riciclaggio in sezioni adiacenti dell'autostrada nazionale N2 nell' East Griqualand, Sudafrica, che forniscono una base di comparazione dei costi di riabilitazione, riportata in termini di Relative Cost Index (rapporto del costo a metro quadro).

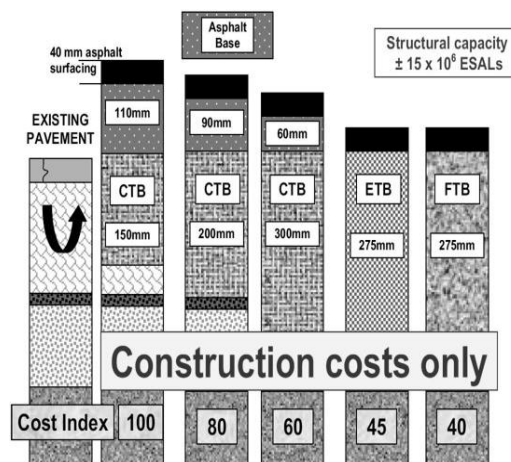


Figura 3. 6: Progressione di progetti di riciclaggio in Sudafrica e relativi costi. Nota: CTB = Cement Treated Base, ETB = Emulsion Treated Base, FTB = Foamed Bitumen Treated Base

La progressiva diminuzione dei costi di riabilitazione necessaria a fornire la stessa capacità strutturale della strada riabilitata ha subito la seguente evoluzione:

- 1989, riabilitazione con attrezzatura convenzionale (graders and ploughs) e 3% OPC di cemento a una profondità di **150 mm**, seguita da uno strato di base di asfalto di 110 mm e manto di usura di 40 mm.
- 1991, riciclaggio in situ con fresatrice modificata usando 2% OPC per una profondità di **200 mm**, seguita da 90 mm di strato di base in asfalto e 40 mm di manto di usura.
- 1993, riciclaggio in situ con macchina appositamente costruita usando 2% OPC per una profondità di **300 mm**, seguita da 60 mm di strato di base in asfalto e 40 mm di manto di usura.
- 1994, riciclaggio in situ con macchina appositamente costruita usando 2% OPC e 5% di emulsione bituminosa per una profondità di 275 mm, seguita da 40 mm di manto di usura.

Successivamente a questi casi di studio, la tecnologia con bitume schiumato ha consentito un'ulteriore riduzione dei costi di riabilitazione: facendo uso di un 3% di bitume schiumato e 1% di OPC per una profondità di riciclaggio di 275 mm si è arrivati al raggiungimento di costi di riabilitazione relativi pari al 40% dell'equivalente procedura convenzionale. È bene notare che il Relative Cost Index si applica solamente ai costi di costruzione iniziali. Un approccio più ampio è richiesto per tenere conto dei valori legati alla manutenzione e al recupero (es. life cycle cost, LCC); risulterebbe in tal caso un'ulteriore riduzione dal 5 al 10% per le opzioni riguardanti i materiali stabilizzati a bitume BSM (emulsione o schiumato) dovuta alla natura flessibile dei leganti e alla minore frequenza di aggiunte di strati durante la vita dell'opera.

3.3 **RICICLAGGIO DEL FRESATO IN ITALIA**

3.3.1 **INTRODUZIONE AL RICICLAGGIO**

Secondo l' *European Asphalt Pavement Association* (EAPA) l'Italia ha prodotto, nel solo 2006, 44.3 milioni di tonnellate di conglomerato bituminoso, come totale delle tecnologie "a caldo" e "a tiepido" (*hot e warm mix asphalt*), descrivendo negli ultimi anni una progressiva diminuzione, certamente influenzata dalla crisi economica mondiale oltrech  dall'implicito effetto di saturazione della rete con le opere di costruzione stesse.

Il nostro Paese attualmente si colloca al quinto posto, a quota 29 Mt, nella classifica europea di tale produzione relativa all'anno 2010 che vede in testa la Germania (45), seguita da Francia (38.8), Turchia (35.3) e Spagna (34.4). Nello stesso anno si sono generati 11 milioni di tonnellate di fresato (o pi  in generale di RAP), subito dietro alla Germania capoclassifica con 14 Mt, con un suo reimpiego in applicazioni di *hot e warm recycling* pari al 20% (dati EAPA).

Tale dato   nettamente inferiore a quello riportato per altri paesi europei che, in certi casi riutilizzano l'80-100% del materiale prodotto [Asphalt in Figures 2010, *European Asphalt Pavement Association*, EAPA].

A tali dati deve affiancarsi quello dell'analisi delle modalit  di manutenzione della rete stradale che, ad oggi, vede un deciso sbilanciamento verso la produzione di conglomerati bituminosi per strati superficiali, pari al 50% della produzione complessiva, rispetto ad un 30% per strati intermedi e solo un 20% per strati di base.

Altri Paesi europei privilegiano il rifacimento di strati profondi a differenza di quanto accade in Italia ove la rete stradale   interessata, oramai da anni, da una carenza di

manutenzione strutturale rafforzativa, necessaria per far fronte ai crescenti traffici ed alla vetustà della rete stessa.

Gli effetti negativi che derivano dal quadro delineato sono da rilevare nell'ambiente soggetto al progressivo depauperamento delle risorse vergini ed al crescente inquinamento indotto sia dal conferimento in discarica di materiali non reimpiegati, sia dalle emissioni in atmosfera all'atto della produzione, del trasporto e della stesa dei conglomerati bituminosi.

A ciò si aggiungano gli effetti negativi per i gestori delle strade costretti, per mancanza di fondi e per mantenere condizioni di sicurezza accettabili, a privilegiare interventi di manutenzione superficiale degli strati bituminosi che, da soli, non risolvono le carenze strutturali delle sovrastrutture.

Allo stesso tempo anche le imprese costruttrici registrano difficoltà nel reperimento di aggregati e leganti di qualità a costi sostenibili ed, in molti casi, operano sfruttando solo una quota parte (40% circa) del proprio potenziale produttivo.

Il ricorso esteso a tecniche di riciclaggio quale strumento manutentorio e di valorizzazione del patrimonio stradale trova, quindi, una più che ampia giustificazione soprattutto per quel che concerne la salvaguardia ambientale in termini di riduzione degli approvvigionamenti di materiali vergini e dei processi di conferimento in discarica gravosi, tra l'altro, anche in termini paesistici.

Vi è poi la riduzione dei costi di produzione e l'incremento di quest'ultima favorita anche dall'eliminazione degli oneri di smaltimento dei materiali di risulta.

Purtroppo, le attività di riciclaggio dei c.b. in Italia non mostrano ancora un deciso impulso al largo impiego a fronte degli innegabili vantaggi. Si continua dunque a interrogarsi sulle ragioni che, tuttora, non favoriscono la diffusione del riciclo del c.b. fresato (o più in generale RAP) come materia prima seconda.

L'analisi critica di tale fenomeno, condotta recentemente dall'AIPCR a livello europeo, attribuisce le cause ai seguenti fattori:

- scarsa conoscenza dei vantaggi ottenibili: la modesta diffusione dei risultati sperimentali positivi determina incertezza sulle tecniche e sui materiali alternativi;
- carenza di normativa tecnica di riferimento;
- legislazioni inadeguate: complessità delle norme sul riciclo quale deterrente alla ricerca ed all'innovazione;
- sbilanciamento tra domanda ed offerta;
- comune convincimento che i materiali e le tecniche di riciclo siano più costosi di quelle tradizionali.

3.3.2 IL FRESATO DI ASFALTO NELLA RECENTE GIURISPRUDENZA

Il c.b. fresato di asfalto, infine, per quanto qui maggiormente interessa, è un aggregato avente una curva granulometrica caratterizzata da un'elevata percentuale di fini e contenente bitume invecchiato. Esso si ottiene dalla frantumazione a blocchi o dalla fresatura della pavimentazione stradale. Può quindi essere correttamente definito alla stregua di un materiale inerte bitumato e non consolidato.

La giurisprudenza più autorevole, ormai da più di un lustro, considera, salvo rare eccezioni (cfr., minoritaria, Cass. Pen., sentenza n. 9503/2005) il fresato bituminoso, non contaminato da catrame di carbone, un rifiuto, cui è attribuito il Codice CER 17 03 02 (miscele bituminose diverse da quelle di cui alla voce 17 03 01*). “I materiali provenienti dallo smantellamento di strade e consistenti in materiali disomogenei e composti (conglomerato bituminoso, cordoli di travertino, materiale plastico e ferroso misto a terreno vegetale e terra rossa)” – dice la Cassazione – “sono rifiuti [...] posto che non sono costituiti esclusivamente da terriccio e ghiaia, ma altresì da pezzi di asfalto e di calcestruzzo, costituenti rifiuti” (Cass. Pen., Sez. III, sentenza n. 39568 del 28 ottobre 2005). Come tale, quindi, il fresato di asfalto proveniente dal disfacimento del manto stradale, costituendo rifiuto, viene sottoposto alla disciplina del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 (v. in giurisprudenza, con riferimento al previgente decreto Ronchi, Cass. Pen., Sez. III, sentenza n. 16695 del 8 aprile 2004). Detto rifiuto è principalmente costituito da materiali inerti quali pezzi di conglomerato bituminoso, cordoli di travertino, materiale ferroso misto a terreno vegetale e terra rossa, ecc., riutilizzabile, previo trattamento, quale sottofondo per sedi stradali e/o per ritombamenti e rilevati di vario genere. Per “rifiuti inerti” si intendono a titolo esemplificativo, il calcestruzzo, le macerie (costituite da materiali di risulta quali laterizi e piastrelle), i ritagli di lavorazione di pietra e gli sfridi, ecc.. Per essere avviati proficuamente a

recupero, detti rifiuti devono essere sottoposti ad onerosi e tecnologicamente avanzati procedimenti finalizzati alla cernita, alla separazione ed alla definitiva eliminazione di sostanze estranee e potenzialmente inquinanti quali ad esempio metalli, plastiche, carta, legno e tutti gli altri elementi “non inerti” che li compongono. Ricordiamo come, a livello normativo, secondo quanto stabilito dalla Direttiva 1999/31/CE, recepita nel nostro ordinamento dalla disposizione di cui all’art. 2, D.Lgs. n. 36 del 13 gennaio 2003, in tema di discariche, per rifiuti inerti devono intendersi “*i rifiuti che non subiscono alcuna trasformazione fisica, chimica o biologica significativa*”. Essi, infatti, prosegue la norma, “*non si dissolvono, non bruciano né sono soggetti ad altre reazioni fisiche o chimiche, non sono biodegradabili e, in caso di contatto con altre materie, non comportano effetti nocivi tali da provocare inquinamento ambientale o danno alla salute umana*”. Precipua caratteristica di detti rifiuti è dunque la loro scarsa tendenza a dar luogo a percolati e residui tossici o nocivi di sorta. Qualora, pertanto, il materiale in questione si appalesi come asfalto e pietrisco con modestissima (se non nulla) presenza di “scaglie” di materia plastica, esso può, come spiegato, a ragion veduta essere ascritto alla categoria dei rifiuti inerti. La giurisprudenza della Suprema Corte ha, in ogni caso, escluso che esso possa rientrare nella nozione di “terre e rocce da scavo” (cfr., da ultime, Cass. Pen., sentenza n. 7466 del 19 febbraio 2008 e Cass. Pen., sentenza n. 18364 del 7 maggio 2008). Con le citate due recenti sentenze, la Suprema Corte ha infatti confermato come, anche dopo l’entrata in vigore della normativa che ha escluso dal regime dei rifiuti le terre e rocce di scavo, i materiali provenienti dall’escavazione di strade continuino a costituire rifiuti, posto che non sono formati esclusivamente da terriccio e ghiaia, ma anche da pezzi di asfalto e calcestruzzo, i quali sono ritenuti rifiuti inerti.

Cosicché, al pari degli inerti provenienti dalla demolizione degli edifici, il fresato può essere sottratto alla disciplina sui rifiuti solo qualora ricorrano i presupposti di legge affinché esso possa essere ricondotto alla nozione di sottoprodotto di cui all’art. 183, lettera p) del D.Lgs. n. 152/2006, ossia solo ed esclusivamente a condizione che il residuo sia riutilizzato

senza subire trattamenti preliminari e solo ove ne sia certo l'effettivo reimpiego, senza danni all'ambiente, nell'ambito dello stesso sito o nello stesso ciclo che lo ha generato. In tal caso, quindi, sussistendone le condizioni previste dalla norma, sarebbe auspicabile, anche per motivi economici, che il riutilizzo venga effettuato direttamente dalla stessa impresa che ha generato il fresato, nell'ambito del medesimo cantiere di manutenzione stradale, ma ciò, come accennato, non esclude minimamente la necessità di fornire la prova certa della sussistenza delle condizioni di applicabilità del regime più favorevole dei sottoprodotti (cfr., in tema di regime di favore ed oneri della prova, P. FICCO, *Gestire i rifiuti*, Milano, 2008, 41 ss.). Si ritiene pertanto preferibile destinare il conglomerato bituminoso non contenente sostanze pericolose (Codice CER 17 03 02) al recupero in procedura semplificata, in conformità al punto 7.6, Allegato 1, sub allegato 1, D.M. 5 febbraio 1998 e con le modalità previste negli artt. 214-216 del T.U. ambientale. Nessuna assimilazione, è bene dunque ricordare, può essere operata con riguardo alle terre e rocce di scavo così come individuate al punto 7.31-bis, Allegato 1, sub allegato 1, D.M. 5 febbraio 1998 (recupero agevolato di rifiuti non pericolosi), laddove le stesse sono esclusivamente riconducibili alla "attività di scavo". Lo stesso D.M. 5 febbraio 1998, al citato punto 7.31-bis, n. 2, le classifica come "materiale inerte vario costituito da terra con presenza di ciottoli, sabbia, ghiaia, trovanti, anche di origine antropica". Il riferimento ai c.d. "trovanti" non può certo essere ascritto all'asfalto, trattandosi, per converso di ciò che si trova accidentalmente nella terra da scavo, essendovi stato interrato da qualcuno o qualcosa non conoscibili. La sopra menzionata caratteristica non è rinvenibile nell'asfalto, ad esclusione di qualche piccolo frammento di materiale bituminoso che possa essere fortuitamente rinvenuto nella terra e roccia, ma sempre all'esito di un'attività di scavo. In conclusione, quindi, poiché l'asfalto non può certamente derivare da attività di scavo (bensì, semmai, di

lamatura e smantellamento della pavimentazione stradale), non si ritiene che esso sia ascrivibile alla categoria delle terre e rocce da scavo.

3.4 TECNICHE DI RICICLAGGIO A FREDDO

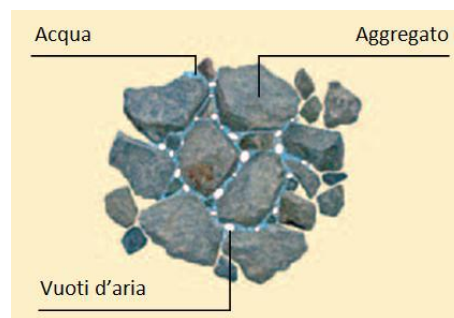
3.4.1 INTRODUZIONE

Secondo lo Speciale sul Riciclaggio del periodico “*In movimento*” del Novembre 2005 riciclare è oggi una esigenza improrogabile ed il riciclaggio a freddo una via obbligata. Il riciclaggio a freddo può essere realizzato impiegando due diverse forme di legante bituminoso: la tradizionale emulsione bituminosa (in generale polimerica) o il cosiddetto bitume schiumato. L'utilizzo di emulsioni bituminose per il ripristino in sito di pavimentazioni bituminose degradate è pratica diffusa sin dagli anni cinquanta nel Regno Unito e negli Stati Uniti. L'idea di schiumare il bitume caldo tramite iniezione di aria a bassa pressione per il confezionamento di miscele bituminose fredde, invece, si attribuisce a L.Csanyi (Università dell'Iowa) che la concepì più di 40 anni fa. Si osservi fin d'ora come in realtà il processo che impiega bitume schiumato richieda comunque la somministrazione di calore al bitume prima della schiumatura (occorre infatti bitume a 160-180°C) e che, quindi, il termine “a freddo” deve essere attribuito più correttamente alla miscela a terra.

Indipendentemente dalla forma in cui si presenta il legante bituminoso impiegato il riciclaggio a freddo vede nel riutilizzo del fresato l'elemento fondante del processo. A seconda delle modalità produttive (in impianto fisso od in situ), delle proporzioni volumetriche delle miscele e delle tipologie di additivi, il prodotto del riciclaggio a freddo può avere diverse denominazioni e diversi impieghi nel pacchetto stradale. Si possono ottenere veri e propri conglomerati bituminosi riciclati a freddo (generalmente prodotti in impianto fisso) con basse percentuali di RAP selezionato ed alti quantitativi di leganti, oppure stabilizzati bituminosi di riciclo (prodotti in sito) in cui, a fianco dei leganti bituminosi a freddo, compaiono anche leganti idraulici per stabilizzare le frazioni

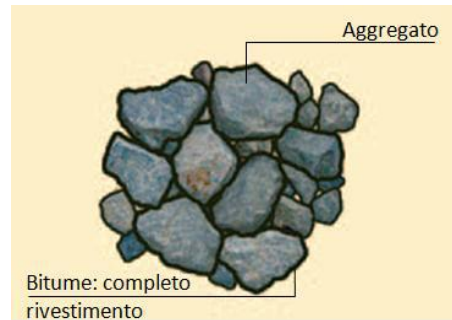
granulometriche non bitumate provenienti dagli strati non legati eventualmente interessati dalla fresatura. Se da un lato i conglomerati bituminosi a freddo con RAP ben si prestano per interventi di risagomatura e riprofilatura di pavimentazioni con degradazioni superficiali, le stabilizzazioni bituminose in sito restituiscono materiali impiegabili con successo negli strati più profondi del pacchetto stradale come accade nella maggior parte delle applicazioni con bitume schiumato. A questo proposito si possono fare alcune considerazioni circa la risposta di uno strato ad un carico imposto: essa dipende largamente dalla proprietà del materiale costituente lo strato (elasticità, plasticità e viscosità) e dalle caratteristiche del carico (entità, frequenza di applicazione, etc.). Tutto ciò ricade in un'area di specializzazione che va al di là dello scopo di questa tesi, perciò si limita qui a riassumere le caratteristiche più importanti:

- Materiali non legati (granulari), che includono roccia frantumata e ghiaia, trasferiscono il carico applicato attraverso le particelle individuali, o scheletro, della loro matrice. L'attrito



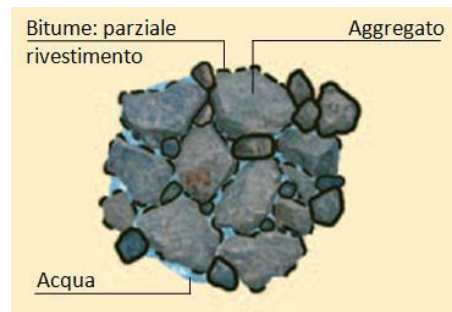
tra i grani mantiene l'integrità strutturale, ma sotto carichi ripetuti (spesso associati ad un aumento del tenore di umidità), si instaura un graduale processo di addensificazione a mano a mano che le particelle si riorientano e si avvicinano le une alle altre. Questo può accadere a qualsiasi livello della struttura stradale, con la conseguenza risultante di deformazioni alla superficie. Tali deformazioni si manifestano solitamente come disconnessioni di ampio raggio lungo il percorso dei pneumatici.

- Materiali legati, che includono materiali stabilizzati (cementati) e asfalto, agiscono più similmente ad un'ampia trave. L'applicazione di un carico verticale in corrispondenza



della superficie di una trave genera sforzi di compressione orizzontali nella metà superiore della stessa e sforzi orizzontali di trazione nella metà inferiore, assumendo i valori massimi agli estremi della sezione della trave. Lo stato di sollecitazione risultante, in particolare quello di trazione al lembo inferiore, porta in ultima analisi ad un meccanismo di rottura per fatica dopo molti cicli di carico. Le fessurazioni si sviluppano all'estremità inferiore dello strato e si propagano poi verticalmente col susseguirsi dei cicli di carico.

- Materiali legati in modo non continuo, in cui ricadono i materiali stabilizzati a bitume (*Bitumen Stabilised Materials*, BSMs) con legante sia sotto forma di emulsione che schiumato, si



comportano in maniera simile ai materiali granulari con la conservazione di un certo attrito interparticellare ma con aumentata coesione e rigidità. La deformazione permanente è la principale modalità di rottura dei BSMs. In questa tipologia di materiali il bitume risulta disperso in modo non continuo e il fenomeno della fatica non rientra perciò tra i fattori determinanti per la progettazione.

La deformazione che si manifesta nei materiali non legati e legati in modo non continuo, e la rottura per fatica dei materiali legati, sono entrambi legati al numero dei cicli di carico. Questo consente di definire la vita utile di una pavimentazione in termini di numero di volte che può essere scaricata prima che essa “ceda”, indicata con il termine di “capacità strutturale” della pavimentazione.

Il riciclaggio a freddo può essere conseguito parimenti in impianto (anche “*in-plant*”), trasportando il materiale recuperato dalla strada esistente a un centro di raccolta dove sarà processato, o *in situ* (anche “*in-place*”) utilizzando una riciclatrice. Il processo in impianto è generalmente l'opzione più costosa in termini di esborso per metro cubo di materiale processato, sostanzialmente dovuto ai costi di trasporto connessi, assenti invece nel caso di trattamento sul posto.

Comunque la lavorazione in impianto diventa attrattiva quando:

- sono richiesti strati addizionali di pavimentazione. Il processo *in-plant* è solitamente preferito laddove materiale recuperato precedentemente stoccato in deposito possa essere riciclato e usato nella costruzione di un nuovo strato stradale. Il materiale trattato con agenti stabilizzanti a base di bitume può quindi anche essere messo a deposito per successivi utilizzi, cosa sempre più popolare per quanto riguarda la gestione dei depositi di *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP);
- materiali differenti devono essere miscelati in proporzioni accurate; e/o
- il materiale della pavimentazione esistente è altamente variabile e richiede un processo di selezione; e/o

- il materiale della pavimentazione esistente è talmente duro da non rendere appropriata la frantumazione in situ. Tali materiali sono rimossi dalla strada e pretrattati prima di essere riutilizzati.

Laddove sia possibile, il riciclaggio “in-place” sarà sempre il metodo preferito, primariamente per i vantaggi economici che offre. Alla luce del deterioramento delle reti stradali su scala globale, gli interventi di riabilitazione delle pavimentazioni esistenti eccedono ampiamente la richiesta di costruzione di nuove strade e il riciclaggio in situ è stato universalmente accettato quale metodo preferito per tali applicazioni.

Concordemente a quanto appena detto attualmente il riciclaggio a freddo è, nella maggior parte dei casi, realizzato direttamente in situ. I vantaggi sotto il profilo economico, logistico e ambientale delle lavorazioni eseguite in cantiere sono noti. Tuttavia, è vero che il binomio a freddo-in situ non consente, in genere, di ottenere materiali di riciclo che possano essere applicati in superficie a causa delle difficoltà nel controllo delle miscele, in generale, e delle curve granulometriche, in particolare. Per questo motivo il processo di riciclaggio a freddo in situ è spesso identificato col nome di “stabilizzazione bituminosa a freddo”. Numerose esperienze in situ hanno mostrato come il riciclaggio a freddo con emulsione polimerica risulti efficace a condizione che si consegua l’eliminazione del contenuto d’acqua residuo contenuto nella miscela posata; le esperienze con bitume schiumato, per contro, hanno mostrato le carenze logistiche del dover fornire al cantiere bitume ad elevata temperatura, ma anche i vantaggi dei minori quantitativi di acqua impiegati, dei minori tempi di maturazione e delle capacità di omogeneizzazione delle miscele. In generale nel processo a freddo per ottenere miscele bituminose di qualità occorre:

- Conoscere le caratteristiche granulometriche e compositive del fresato in relazione alla curva granulometrica di progetto;
- Adottare il legante bituminoso ottimale per quel tipo di fresato;
- Disporre di leganti sotto forma di emulsione o schiumato che consenta una maturazione e completamento delle lavorazioni in tempi brevi;
- Eseguire prove di controllo della miscela bituminosa rigenerata in sito per valutarne caratteristiche ed omogeneità.

Come mostrato da numerose indagini sperimentali, una caratteristica peculiare delle miscele bituminose riciclate a freddo è quella della maturazione. Le caratteristiche meccaniche delle miscele migliorano nel tempo a partire già dal primo giorno di posa. Grazie a questa proprietà intrinseca delle miscele riciclate ed all'effetto di post-compattazione del traffico, le prestazioni strutturali degli strati riciclati a freddo migliorano sensibilmente nel tempo, protraendosi tale incremento delle caratteristiche meccaniche anche per alcuni anni. Operativamente la tecnica del riciclaggio si avvale dei cosiddetti treni di riciclaggio, veri e propri impianti semoventi costituiti da due o più macchine operatrici poste in serie (SITEB, 2002).

3.4.2 STABILIZZAZIONE CON EMULSIONE BITUMINOSA

L'emulsione bituminosa è composta da due liquidi, emulsione ed acqua, immiscibili. I liquidi sono dispersi l'uno nell'altro usando un mulino colloidale. Le più comuni emulsioni bituminose sono formate da goccioline di bitume disperse in una fase continua acquosa, nella quale le particelle di bitume non possono raggrupparsi a causa della presenza di una sostanza tensioattiva (un emulsionante) che forma un campo di forze elettrostatiche attorno alle goccioline con l'ausilio di molecole ionizzate di emulsionante.

La maggior parte delle emulsioni usate come leganti ha una componente di "bitume residuo" del 60%; ciò significa che il 60% del peso dell'emulsione è composto da bitume disperso nel restante 40% composto da acqua. La percentuale di bitume può variare fra il 30 e il 70%, ma percentuali di bitume superiori al 60% non sono consigliabili per il riciclaggio dal momento che l'emulsione diventa viscosa, più difficile da pompare e riveste male gli aggregati.

Le emulsioni bituminose sono state originariamente sviluppate per superare le difficoltà tipiche delle lavorazioni che prevedono l'impiego di bitume a caldo. Inizialmente erano concepite come spray per applicazioni di depolverizzazione.

Gli sforzi tesi a ridurre i consumi energetici, imposti dalla crisi petrolifera degli anni settanta del secolo scorso, hanno incrementato l'uso delle emulsioni nella stabilizzazione di aggregati minerali, compresa la miscelazione con materiali umidi a temperatura ambiente.

Dopo la miscelazione dell'emulsione bituminosa con il materiale ha luogo la cosiddetta "rottura" dell'emulsione, consistente nella separazione del bitume dalla fase acquosa e nella coalescenza delle goccioline di bitume per formare una pellicola continua di bitume che va a depositarsi sugli elementi lapidei. L'acqua in eccesso dell'emulsione

evapora o si separa allontanandosi. Il tempo che intercorre tra la miscelazione e la separazione dei globuli di bitume dalla fase acquosa è chiamato tempo di rottura.

La rottura e la successiva presa sono influenzate dai seguenti fattori:

- la velocità con cui gli aggregati assorbono acqua (gli aggregati ruvidi e porosi riducono il tempo di rottura e di presa assorbendo l'acqua contenuta nell'emulsione);
- il contenuto di umidità della miscela prima della miscelazione influenza il tempo di rottura;
- il contenuto di umidità della miscela dopo il costipamento influenza la velocità di presa;
- la granulometria degli aggregati e la percentuale di vuoti della miscela;
- tipo e qualità dell'emulsione; maggiori concentrazioni di molecole di emulsionate ionizzate producono emulsioni più stabili;
- forze meccaniche causate dal pompaggio, dal costipamento e dal traffico veicolare;
- composizione minerale degli aggregati; può darsi che la velocità di presa sia influenzata dalle interazioni fisico-chimiche tra l'emulsione e la superficie degli aggregati;
- intensità della carica elettrica degli aggregati in relazione a quella dell'emulsione;
- temperatura degli aggregati e temperatura dell'aria, in quanto il calore è un catalizzatore delle reazioni chimiche e provoca una più rapida dissipazione ed evaporazione dell'acqua;
- percentuale e tipo del filler attivo (ossia la quantità di cemento o calce).

Per la realizzazione di strati di fondazione con tale tecnica, insieme all'emulsione bituminosa, nella miscela, viene aggiunto il cemento che contribuisce a migliorare le proprietà meccaniche e ad incrementare la resistenza all'umidità, inoltre agisce come una sorta di catalizzatore, controllando la rottura dell'emulsione, ed aumentando le proprietà di resistenza iniziale della pavimentazione.

La principale ragione per cui si utilizza il bitume emulsionato come legante è che esso permette di miscelare in modo efficace il bitume con materiali freddi e umidi.

Questo si trova in una fase transitoria e affinché il prodotto finale desiderato sia un materiale legato con bitume deve separarsi dall'acqua ed aderire alla superficie degli inerti.

La condizione di rottura e il successivo controllo della presa assumono grande importanza per ottenere le prestazioni desiderate della miscela. Sebbene per il riciclaggio si possano utilizzare sia le emulsioni anioniche che quelle cationiche, queste ultime si prestano molto bene all'uso nel riciclaggio in profondità perché caratterizzate da una rapida velocità di rottura.

Ottenuta la miscela stabilizzata con emulsione, essa deve dissipare l'acqua in eccesso, ossia maturare, affinché la sua resistenza aumenti.

La durata di tale periodo è influenzata dal contenuto d'umidità del materiale, dalle interazioni fra emulsione e aggregati, dal clima locale e dalla percentuale di vuoti della miscela.

Il cemento influisce in maniera significativa sulla velocità di acquisizione della resistenza.

Nella Tabella 3. 1 si riassumono i principali vantaggi e svantaggi dell'applicazione di emulsione bituminosa quale legante.

EMULSIONE BITUMINOSA	
Vantaggi	Svantaggi
<ul style="list-style-type: none"> • Flessibilità: la stabilizzazione con bitume formano un materiale visco-elastico con caratteristiche a fatica superiori alla media, (coesione e resistenza alla deformazione). • Facilità di applicazione: la riciclatrice è collegata al serbatoio e il bitume è iniettato con una barra sprezzatrice. • Accolte facilmente: le emulsioni bituminose sono ben conosciute nel settore dell'edilizia. Sono generalmente disponibili metodi standard di controllo e specifiche tecniche. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo: le emulsioni bituminose normalmente non sono fabbricate in loco. Il trattamento richiede dei controlli di qualità severi e le sostanze emulsionanti sono costose. Si trasporta anche acqua, non solo bitume, con aggravio dei costi di trasporto. • Il contenuto di umidità del materiale nella pavimentazione esistente a volte è troppo elevato e si satura con l'aggiunta di emulsione. • La maturazione può richiedere molto tempo. L'aumento della resistenza dipende dalla perdita di umidità. • Reperibilità: la formulazione richiesta per il riciclaggio non sempre è disponibile.

Tabella 3. 1: Aspetti positivi e negativi dell'applicazione di emulsione bituminosa

3.4.3 STABILIZZAZIONE CON BITUME SCHIUMATO

Il primo impiego del “bitume espanso” come legante in miscele stradali risale al 1956 per opera del dott. Ladis H. Csanyi che nel laboratorio di ricerca dell’università dello Stato dell’Iowa iniettò con successo del vapore nel bitume per creare una massa schiumosa. L’invenzione fu indotta dall’abbondanza di materiali scadenti presenti sul territorio e dalla carenza di aggregati di buona qualità.

Tale metodologia, estremamente conveniente se eseguita negli impianti fissi dove la schiuma poteva essere prodotta tranquillamente, risultava essere poco pratica per le operazioni in sito a causa della necessità di disporre di uno speciale equipaggiamento per il confezionamento delle miscele, quali le caldaie a vapore; essa inoltre trovava una scarsa applicazione su scala mondiale soprattutto a causa dei vincoli imposti dai diritti d’autore sugli inettori della schiuma. Negli anni ’90, con la prescrizione dei diritti d’autore, ci fu un grande aumento di interesse per questa tecnica di stabilizzazione. 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 di 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 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 il volume originale allo stato liquido (Figura 3. 7).

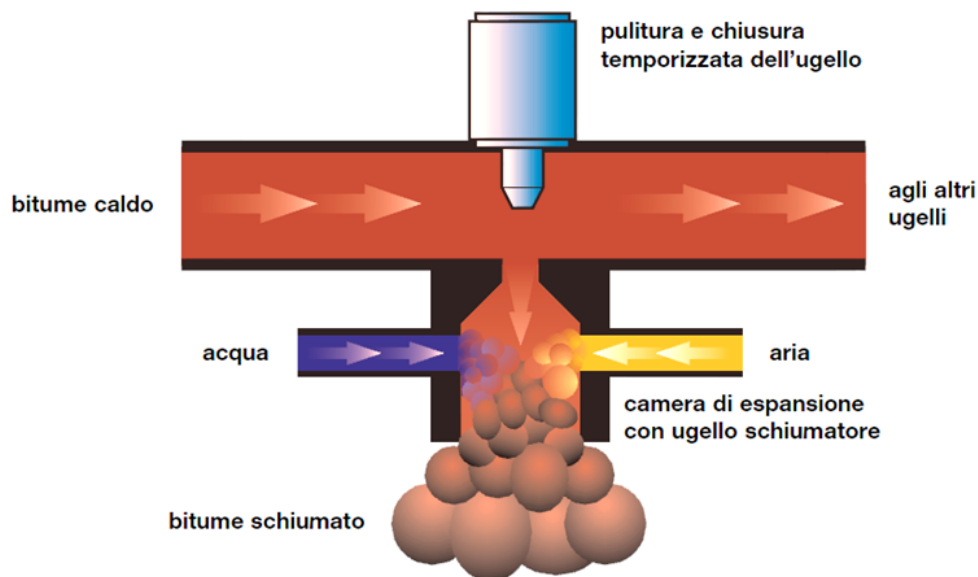


Figura 3. 7: Schema del processo di espansione del bitume

Quando le particelle 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 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 plasticità.

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. Il bitume schiumato è caratterizzato da due principali proprietà:

- 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 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.

Generalmente la schiuma migliore è quella che riesce ad ottimizzare sia il rapporto di espansione che il tempo di dimezzamento (Figura 3. 8).

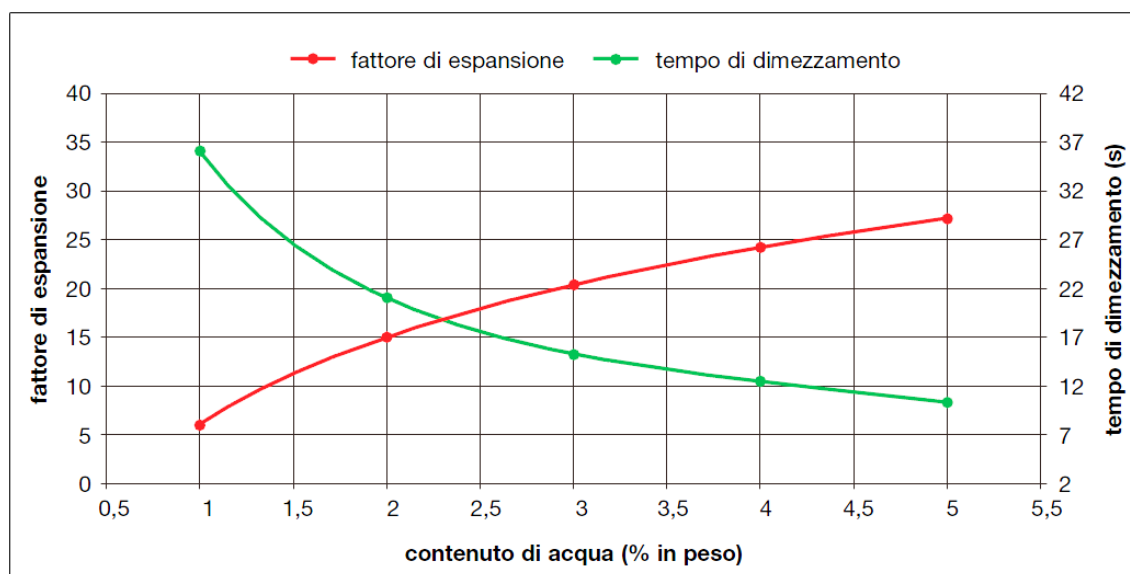


Figura 3. 8: Parametri importanti per valutare la qualità del bitume schiumato: il tempo di dimezzamento e l'espansione diminuiscono con il crescere della quantità di acqua aggiunta

Queste due caratteristiche di rilevante importanza sono influenzate dai seguenti fattori:

- Acqua di aggiunta: aumentando la quantità d'acqua iniettata nel bitume, il volume della schiuma prodotta aumenta 1500 volte. Dunque aumentando la quantità d'acqua crescono le dimensioni delle bolle create e di conseguenza aumenta il rapporto di espansione. 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.

- Tipo di bitume: per la produzione di bitume schiumato sono generalmente usati bitumi aventi indici di penetrazione compresi tra gli 80 e 150, benché in passato si siano usati con successo anche bitumi più solidi soddisfacenti i requisiti minimi riguardanti le proprietà schiumogene.
- Provenienza del bitume: alcuni tipi di bitume schiumano meglio di altri per via della loro composizione
- Temperatura del bitume: la viscosità del bitume è inversamente proporzionale alla temperatura, quindi, quanto più bassa è la viscosità maggiore sarà la temperatura e le bolle che si formeranno quando l'acqua cambierà stato durante il processo di schiumatura;
- 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 dei flussi attraverso gli ugelli, particelle più piccole che avranno maggiore area di contatto e di conseguenza migliora l'omogeneità della schiuma.
- Additivi: Sul mercato ci sono molti prodotti che influenzano le proprietà schiumogene sia positivamente che negativamente.

Nella Tabella 3. 2 si riassumono i principali vantaggi e svantaggi dell'applicazione di bitume schiumato quale legante.

BITUME ESPANSO	
Vantaggi	Svantaggi
<ul style="list-style-type: none"> • Pavimentazione flessibile e resistente: il materiale trattato con bitume espanso a una Malta flessibile che lega le particelle più grosse. Ha quindi una resistenza alla deformazione e a fatica superiore alla media. • Facilità di applicazione: la riciclatrice è collegata al serbatoio e il bitume è iniettato con una speciale tipo di barra sprezzatrice. • Costo: il bitume espanso è composto da bitume avente un indice di penetrazione standard. Non ci sono ulteriori costi di produzione, è perciò meno costoso delle emulsioni. • Tasso di aumento della resistenza: il materiale può sopportare il carico del traffico subito dopo la posa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Il processo di espansione richiede un bitume molto caldo, al di sopra dei 160 °C. Ciò richiede di solito una attrezzatura speciale dotata di determinate misure di sicurezza. • Qualità del bitume: la qualità del materiale stabilizzato è determinata dalle caratteristiche schiumogene che dipendono ampiamente dalla qualità del bitume. • Tipo di materiale e condizioni: il materiale saturo e il materiale caratterizzato da una carenza di fini non possono essere trattati con bitume espanso

Tabella 3. 2: Aspetti positivi e negativi dell'applicazione del Bitume Espanso

3.4.4 CONSIDERAZIONI SULL'UMIDITÀ NEI BSMs

Il ruolo dell'umidità nel materiale stabilizzato è simile per l'emulsione di bitume e per la tipologia schiumato sotto molti aspetti, ma sussistono alcune differenze.

Il contenuto totale di fluido nella miscela (umidità e bitume) è ciò che va considerato.

Tale ruolo nei due tipi di BSM è spiegato nella Tabella 3. 3 sottostante.

RUOLO DEI FLUIDI NEL BSM		
Componente	BSM-emulsione	BSM-schiumato
Bitume	Contribuisce ai fluidi per la compattazione	Contributo trascurabile ai fluidi per la compattazione
Umidità nell'aggregato	Riduce l'assorbimento dell'acqua dell'emulsione da parte dell'aggregato	Separa e disperde le frazioni fini rendendole disponibili al bitume durante la miscelazione
	Previene una rottura prematura	Agisce come vettore per le particelle di bitume durante la miscelazione
	Estende il tempo di curing e riduce la resistenza iniziale	Riduce la resistenza iniziale
	Permette la lavorabilità del BSM a temperatura ambiente	
	Riduce l'angolo di attrito e funge da lubrificante per la compattazione	
	Fornisce al mix un certo tempo di conservazione	

Tabella 3. 3: Ruolo dei fluidi nei materiali stabilizzati a bitume (BSMs)

La Figura 3. 9 riporta la variazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali stabilizzati a bitumi nelle due forme di emulsione e schiumato al variare del contenuto di umidità con il tempo.

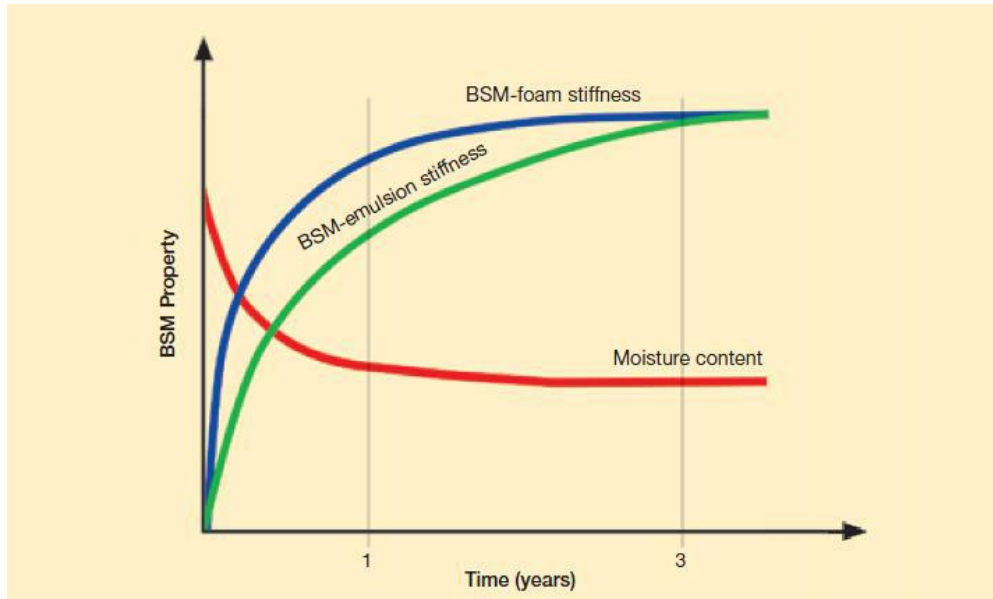


Figura 3. 9: Modificazione delle caratteristiche meccaniche dei due tipi di BSMs al variare del contenuto di umidità nel tempo

Infine in Tabella 3. 4 si riassumono le caratteristiche principali dei trattamenti con emulsione e tradizionali.

Comparison between different types of bitumen application			
Factor	BSM-emulsion	BSM-foam	Hot-mix Asphalt
Aggregate types applicable	<ul style="list-style-type: none"> - Crushed rock - Natural gravel - RAP, cold-mix - RAP, stabilised 	<ul style="list-style-type: none"> - Crushed rock - Natural gravel - RAP, stabilised - Marginal (sands) 	<ul style="list-style-type: none"> - Crushed rock - 0 - 50% RAP
Bitumen mixing temperature	20°C - 70°C	160°C - 180°C (before foaming)	140°C - 180°C
Aggregate temperature during mixing	Ambient (> 10°C)	Ambient (> 15°C)	Hot only (140°C - 200°C)
Moisture content during mixing	OMC plus 1% minus emulsion content	Fluffpoint MC i.e. 70% - 90% of OMC	Dry
Type of coating of aggregate	Partial coating of coarse particles and cohesion of mix with bitumen/fines mortar	Coating of fine particles only with "spot welding" of mix from the bitumen/fines mortar	Coating of all aggregate particles with controlled film thickness
Construction and compaction temperature	Ambient	Ambient	140°C - 160°C
Air Voids	10 - 15%	10 - 15%	3 - 7%
Rate of initial strength gain	Slow	Medium	Fast
Modification of binder	Yes	No. Modifiers are generally anti-foamants	Yes
Important parameters of binder	<ul style="list-style-type: none"> - Emulsion type (anionic, cationic) - Residual bitumen - Breaking time - Curing 	<ul style="list-style-type: none"> - Half-life - Expansion Ratio - Curing 	<ul style="list-style-type: none"> - Penetration - Softening point - Viscosity

Tabella 3. 4: Confronto tra diverse tecniche di intervento

3.5 PREGI E DIFETTI DEL RICICLAGGIO A FREDDO IN SITO

3.5.1 I PREGI

Il riciclaggio a freddo in sito è assolutamente il metodo di recupero dei materiali stradali che rispetta maggiormente l'ambiente, i vantaggi derivanti dall'utilizzo di tale tecnica sono molti e tutti di particolare importanza. Vanno ricordati:

- L'assenza di asporto di materiale: grazie al riciclaggio dell'asfalto scarificato normalmente fresato non sono necessari trasporti fino alla discarica ma solo, eventualmente, piccoli spostamenti all'interno del cantiere.
- L'assenza di smaltimento di materiale: il materiale di recupero non asportato non deve essere smaltito. Questo è particolarmente importante nel caso in cui l'asfalto scarificato contenga catrame, il cui smaltimento è estremamente costoso (tali materiali sono annoverati tra i "rifiuti speciali" e sono soggetti ad apposite leggi in materia di smaltimento);
- Diminuzione o, a volte, totale assenza di materiali vergini: il riutilizzo della materia di recupero contribuisce alla salvaguardia e al rispetto dell'ambiente;
- Assenza di inquinamento dell'aria: il fatto di non dovere scaldare il bitume implica l'assenza di combustioni, quindi l'assenza di emissioni nocive per l'ambiente;
- Assenza di energie di processo: il conglomerato confezionato a caldo richiede circa 12 litri di olio combustibile per tonnellata nell'impianto di miscelazione. L'energia di processo è quindi l'energia spesa per portare la miscela di inerti e il bitume alla temperatura di circa 160°C. Contrariamente a questo procedimento, il riciclaggio a freddo non consuma alcuna energia di

processo ma solo energia di trasformazione (peraltro utilizzata anche nel riciclaggio a caldo);

- Maggiore rispetto della salute: utilizzando bitume a temperatura ambiente, non si rilascia ne fumi ne vapori (idrocarburi volatili) e quindi neppure ozono a livello del suolo. Il riciclaggio a freddo non è tossico e non comporta alcun pericolo per il personale addetto e per gli abitanti del luogo;
- La limitazione dei tempi di chiusura al traffico: il riciclaggio in sito in genere (sia a caldo che a freddo) consente di ridurre i tempi di chiusura delle arterie soggette a rifacimento; inoltre il riciclaggio a freddo non necessita dei tempi di raffreddamento del conglomerato steso di cui invece abbisogna la metodologia a caldo. Nel caso di riciclaggio in centrale, il continuo transito dei mezzi che riforniscono il cantiere di materie prime si va a sommare al traffico esistente, generando ritardi nei rifornimenti che si ripercuotono sulla produttività, riducendola anche di 4-5 volte con notevoli danni per l'impresa esecutrice e per l'ente appaltatore, a cui va a sommarsi un maggiore pericolo per gli operatori e per l'utenza della rete viaria;
- La possibilità di impiego in piccole strade: i macchinari per il riciclaggio a caldo sono estremamente ingombranti ed inadatti al rinnovamento delle piccole arterie, quelli per i trattamenti a freddo possono essere impiegati per tali mansioni, operando così anche su strade provinciali, comunali e consortili oltre che sulle autostrade.

Nella Figura 3. 10 e Figura 3. 11 si propone un confronto tra l'impiego di tecniche tradizionali e tecniche di riciclaggio a freddo sotto gli aspetti di richiesta energetica e di materiale vergine rispettivamente.

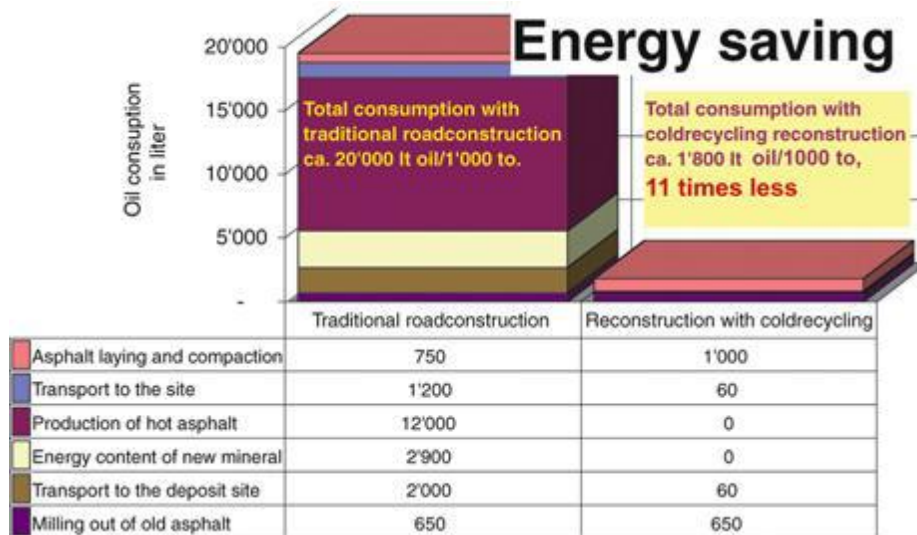


Figura 3. 10: Consumo energetico per tecniche tradizionali e riciclaggio a freddo

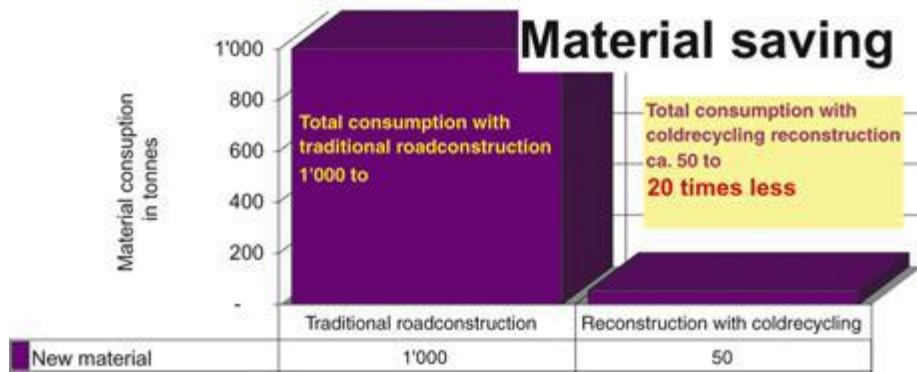


Figura 3. 11: Consumo di materie prime per tecniche tradizionali e riciclaggio a freddo

3.5.2 I DIFETTI

Nonostante tale metodologia presenti tutti questi vantaggi non si può pensare che essa non abbia dei limiti, i più rilevanti sono:

- Necessità di uno studio approfondito in laboratorio: nel riciclaggio a freddo le quantità di fresato, acqua, emulsione e cemento devono essere ottimizzate in laboratorio. In assenza di uno studio approfondito il materiale potrebbe non risultare valido con proprietà meccaniche e reologiche non adeguate.
- L'elevato volume dei vuoti del prodotto confezionato (che può raggiungere valori anche del 15%) fa sì che presenti un basso valore della densità. Una conseguenza provocata da questa caratteristica volumetrica si può riscontrare in una scarsa capacità portante e limitate performance meccaniche;
- difficoltà di rigenerare il legante organico presente nel RAP mediante trattamenti a freddo: nel riciclaggio a caldo si riesce ad ottenere una revitalizzazione del vecchio bitume se mescolato con quello vergine addizionato di ACF. Nel riciclaggio a freddo, la mancanza di elevate temperature condiziona tale processo limitando la fusione del vecchio bitume al nuovo nonostante l'aggiunta di agenti chimici funzionali e/o rigeneranti [21]. Tutto questo comporta nei trattamenti a freddo l'impiego di un surplus di legante vergine;
- difficoltà nella lavorazione dell'impasto: questo difetto è comune ai trattamenti in sito, sia a freddo che a caldo. Per motivi pratici i mezzi impiegati non possono avere dimensioni eccessive e quindi avere camere di miscelazione sufficientemente ampie da garantire una buona amalgamazione del conglomerato.

3.6 IL RICICLAGGIO IN SITO

3.6.1 INTRODUZIONE

Il riciclaggio a freddo trova nell'esecuzione in sito la sua espressione più tipica. Al fine di confezionare un prodotto di qualità, attraverso il riciclaggio, occorre adottare una corretta tecnica di demolizione e miscelazione della preesistente pavimentazione stradale utilizzando macchinari appositamente studiati per questi impieghi. In passato questi mezzi avevano ridotte produzioni orarie (sotto le 50 t/h) e non consentivano di realizzare conglomerati bituminosi che possedessero caratteristiche uniformi all'interno della stessa stesa (erano originariamente destinate ad altre funzioni poi riadattate al fine del riciclaggio). I macchinari moderni, grazie ai migliorati sistemi di miscelazione e al controllo computerizzato dei dosaggi delle materie prime, confezionano un prodotto di ottima qualità con una produzione oraria elevata. Le riciclatrici "in situ" possono lavorare a profondità che eccedono i 300 mm, frantumare e utilizzare il 100% del materiale presente in situ, mantenere un orizzonte reimpostato all'interno della pavimentazione esistente e produrre una miscela dalle qualità comparabili a quelle relative ai processi in impianto, operando su una larghezza di circa 2 m: in pratica, in un unico passaggio della fresatrice è possibile demolire un intero pacchetto di pavimentazione. Volendo quantificare il conglomerato prodotto nell'unità di tempo con le varie metodologie (riciclaggio in situ o in centrale) non è possibile prescindere da considerazioni pratiche quali l'accessibilità del cantiere da parte dei mezzi d'opera, in considerazione del trasporto e della presenza di traffico (autocarri che rimangono coinvolti nella coda conseguente i lavori). Il conflitto con il traffico pubblico è limitato ai veicoli di supporto che accedono all'area di cantiere. In media la produzione oraria teorica di un impianto fisso per il riciclaggio a freddo è di circa 200 t/h, a fronte di

valori anche oltre le 350 t/h ottenibili in un processo di riciclaggio in situ, ma non sempre confrontabili perché condizionate dalle specifiche modalità di esecuzione. Aree deboli nella sottostante pavimentazione non sono disturbate e l'esposizione a inclementi condizioni meteorologiche è significativamente ridotto dalla possibilità di processare il materiale con una singola passata e di compattarlo immediatamente a seguito della riciclatrice. In aggiunta sono possibili tassi di produzioni alti fino a 10.000 m² per volta e il rischio di cedimenti dovuti alla scarsa qualità del lavoro sono drasticamente ridotti. Il riciclaggio a freddo in situ consente di ottenere in un'unica passata tutto ciò che un tempo veniva realizzato laboriosamente con tutta una serie di onerose operazioni distinte, come indicato in Figura 3. 12. I vantaggi di costo derivanti dalla riduzione al minimo sia del numero delle macchine utilizzate che dei costi della manodopera, unitamente al considerevole risparmio di tempi, ne costituiscono i grandi punti di forza su cui è imperniata la sua crescente diffusione.

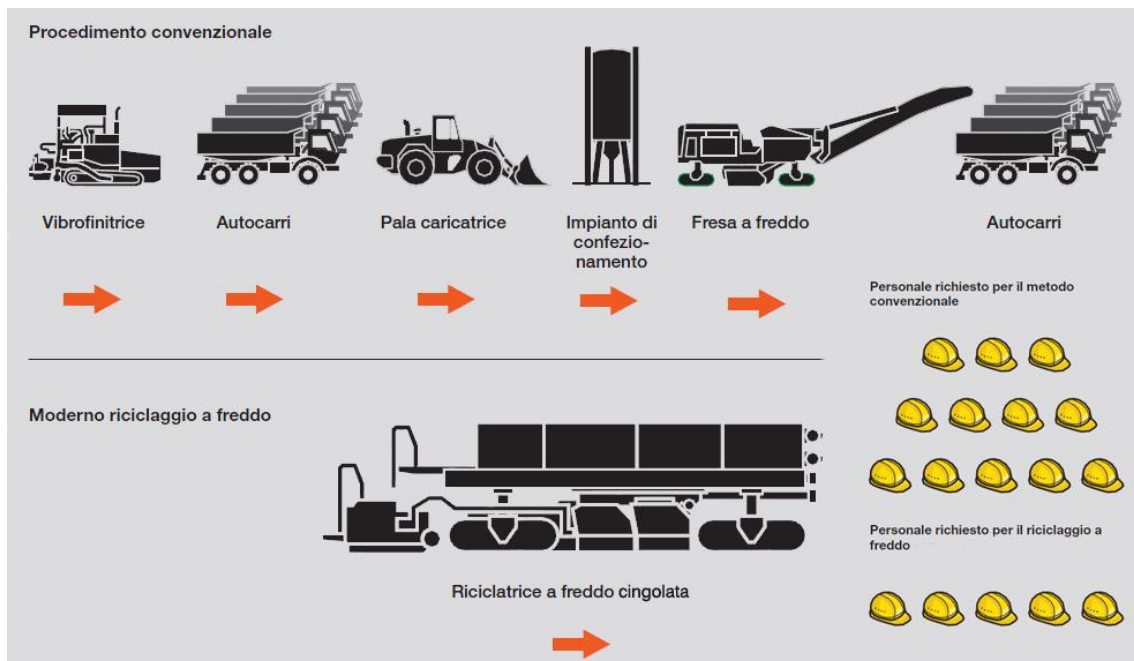


Figura 3. 12: Maggiore efficienza di un moderno processo di riciclaggio a freddo.

Con queste capacità, le riciclatrici hanno offerto agli ingegneri stradali tutto un nuovo range di possibilità, la più importante delle quali essendo quella di costruire spessi strati monolitici di materiale stabilizzato. Da un punto di vista strutturale, un singolo strato di 300 mm di spessore di materiale stabilizzato a una più ben alta capacità di carico che non due separati strati da 150 mm di spessore costruiti uno sull'altro (Figura 3. 13). Questo concetto è ben noto nel settore delle costruzioni dove le travi laminate sono utilizzate come componenti strutturali.



Figura 3. 13: Uno strato spesso di materiale legato si comporta in modo simile a una trave laminata

3.6.2 CAMPI DI APPLICAZIONE

Il riciclaggio a freddo con emulsione o bitume schiumato è un'alternativa alla ricostruzione con rimozione dei materiali da riabilitare. La tecnica si presta a diverse casi di applicazione, che possono essere differenziati in base alla finalità dei lavori:

- Stabilizzazione della base granulare di pavimentazioni flessibili insieme allo strato superficiale bituminoso danneggiato per formare un forte strato di base di materiale trattato, incrementandone la capacità strutturale;
- Riciclaggio di strati bituminosi superiori ammalorati per fatica per formare un nuovo strato di base;
- Riciclaggio dello strato superficiale ed alcuni centimetri dello strato di base di pavimentazioni semi-rigide per correggere discontinuità all'interfaccia e ricostruire una nuova superficie;
- Riciclaggio del solo strato superficiale di asfalto per porre rimedio al fenomeno del cracking e all'eccessivo invecchiamento del legante.

All'interno del sistema operativo "riciclaggio a freddo", l'attività di cantiere inizia con la fresatura, alla quale segue quella che forse è la fase più interessante, la rigenerazione a freddo del conglomerato fresato. Le ultime due lavorazioni per una pavimentazione stradale riciclata a freddo sono la stesa e la rullatura del conglomerato. Attualmente esiste una macchina capace di fresare, impastare e stendere ed è la riciclatrice finitrice.

3.6.3 FRESATURA

Questa lavorazione avviene tramite opportune macchine operatrici, le fresatrici o le riciclatrici, costituite da un tamburo cilindrico rotante e dotato di apposite sedi, in cui alloggiavano particolari punte di acciaio speciale (Figura 3. 14). Durante l'avanzamento della fresa, il tamburo viene fatto ruotare molto velocemente da un motore diesel di grossa cilindrata; le punte d'acciaio, nell'urtare la pavimentazione, la frantumano. Durante la fresatura a causa della frantumazione del materiale viene sollevata molta polvere, per questo le macchine vengono munite di un'apparecchiatura per la nebulizzazione dell'acqua, disposta sopra il tamburo rotante; il velo d'acqua che si forma trattiene le parti più fini della polvere.



Figura 3. 14: Il tamburo rotante di una riciclatrice gommata

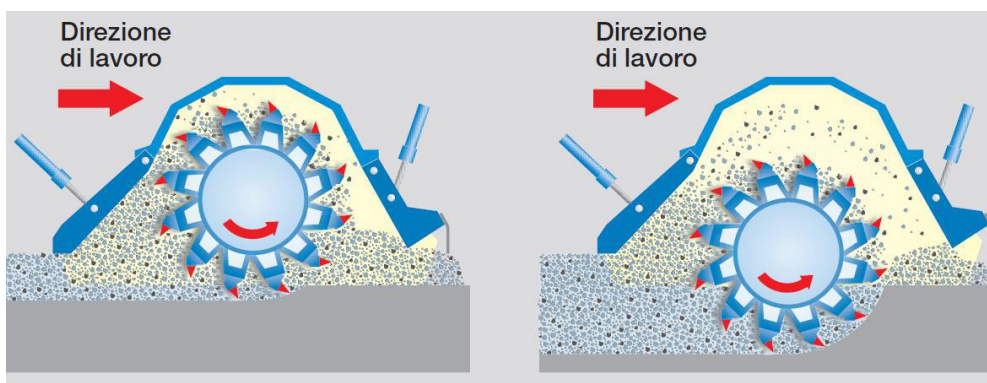


Figura 3. 15: Il vano di miscelazione variabile garantisce il volume di miscelazione ottimale a ogni profondità operativa

Le dimensioni delle frese consentono interventi settoriali e specifici sulla superficie in esame in funzione dei diversi tipi di ammaloramento e del loro stato di gravità. È ad esempio possibile operare su tutta la sede o solo su una parte di essa con piccoli interventi a “tassello”. Inoltre sono capaci di asportare uno spessore studiato, con il rispetto delle pendenze e di tutti i punti fissi di riferimento presenti, e di risagomare la strada in esame sia in funzione del problema attuale sia in relazione alle varie manutenzioni che si ipotizzano in futuro. In base al tipo di intervento è possibile regolare il volume della camera di fresatura in dipendenza del volume di materiale che è necessario trattare (Figura 3. 15). La superficie ottenuta dalla fresatura risulta particolarmente adatta a fungere da base di ancoraggio, garantendo l'assenza di scorrimento tra il vecchio materiale ed il nuovo che lo deve ricoprire.

3.6.4 RIGENERAZIONE

Ultimata la fase di fresatura, l'attività in cantiere prosegue con la rigenerazione del conglomerato fresato. Il materiale fresato preparato per l'impasto e corretto granulometricamente viene caricato dalla macchina rigeneratrice o lavorato dalla stessa riciclatrice, le quali svolgono anche funzioni di pulizia con l'aspirazione del piano di stesa. Nella macchina il materiale fresato, prima del mescolamento, viene pesato su di una bilancia automatica (le pesate si fanno in t/ora), e sottoposto ad un'azione preventiva di vagliatura con un vaglio vibrante, per l'ulteriore frantumazione delle parti di materiale eccedenti la massima pezzatura prevista. Successivamente il materiale perviene per gravità ad un mescolatore-trasportatore, ubicato nella parte inferiore della macchina, dove tramite degli iniettori avviene l'aggiunta di acqua, di additivo e di bitume. L'acqua, misurata con precisione tramite un impianto di iniezione gestito da un microprocessore, viene accuratamente miscelata con il materiale fresato onde ottenere il contenuto d'umidità ottimale per effettuare il costipamento. Le sostanze stabilizzanti fluide quali l'impasto liquido di cemento-acqua e l'emulsione bituminosa (o il bitume "espanso"), singolarmente o abbinati, possono essere iniettati nella camera di miscelatura mediante una separata barra spruzzatrice. Gli stabilizzanti in polvere, come il cemento Portland, vengono normalmente cosparsi sulla superficie stradale preesistente nella parte antistante la riciclatrice. Quest'ultima passa sopra la polvere e la miscela, unitamente all'acqua, con il materiale sottostante mediante un'unica passata. Sempre per gravità, al termine della miscelazione, il materiale perviene direttamente sul piano della pavimentazione, pronto per essere steso o dalla stessa macchina rigeneratrice o da una macchina finitrice.

3.6.5 STESA DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO



Figura 3. 16: Banco di stesa accoppiato ad una riciclatrice cingolata

La stesa dei conglomerati bituminosi rigenerati a freddo è effettuata con la stessa macchina rigeneratrice (Figura 3. 16) o con finitrici semoventi di tipo tradizionale. Queste ultime hanno il compito di raccogliere l'impasto rigenerato lasciato sulla strada dalla macchina rigeneratrice e di stenderlo sulla pavimentazione. Le macchine finitrici sono dotate di una tramoggia frontale e di un alimentatore a nastro che preleva la miscela rigenerata e la trasporta all'altra estremità della macchina. La parte operatrice comprende un costipatore a trave vibrante ed una piastra lisciatrice: il materiale è così steso direttamente secondo lo spessore voluto, con una pre-compattazione assai utile per ridurre gli addensamenti differenziati che possono comparire in corso di rullaggio. La stesa con le finitrici non permette né di aerare l'impasto, né di riprendere il profilo, però ha il vantaggio di stendere uno spessore più uniforme, di attuare una superficie più regolare con bordi meglio delineati ed operare su una larghezza di 4.2 m.

3.6.6 RULLATURA DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO

Nell'approntamento di un riciclato a freddo, la rullatura è un'operazione particolarmente importante; è in questa fase, che viene eliminata la maggior parte dell'acqua interstiziale e si realizza la rottura definitiva ed irreversibile dell'emulsione bituminosa o (l'eliminazione dei vuoti con l'espanso). La miscela appena stesa può essere compattata mediante un rullo statico metallico da 50 t o da un rullo gommato da 25 t ovvero da un rullo metallico vibrante in dinamico da 50 t. Va tenuto presente che a favore dell'efficacia dei rulli gommati gioca, oltre che il peso, anche l'area d'impronta, la quale è molto grande, specialmente se i pneumatici sono a bassa pressione e permettono perciò un costipamento in profondità. Raggiunto il valore di compattazione previsto dal progetto, si procede alla rullatura finale di rifinitura che viene effettuata alternativamente con l'ausilio di un costipatore a rulli lisci, tandem o triciclo più indicati per ottenere una buona rugosità superficiale.



Figura 3. 17: Compattazione con rulli lisci metallici

Le prestazioni dei rulli lisci possono essere notevolmente migliorate con l'adozione di un sistema vibrante che può essere variato in ampiezza e frequenza. Il procedimento di costipamento per vibrazione è basato sul fatto che la vibrazione riesce ad allentare i leganti

(attrito e coesione) esistenti tra i granuli dell'impasto e risulta perciò di grande efficacia. I rulli vibranti possono essere misti (gommati e metallici vibranti) o solo metallici (vibranti), composti, rispettivamente, da una e due ruote metalliche, di diametro variabile tra i 90 ed i 150 cm e larghezza tra i 120 ed i 250 cm, collegate ad un corpo motore (Figura 3. 17). Qualunque sia il tipo di rullo adoperato, il costipamento di un conglomerato riciclato a freddo deve essere spinto al massimo; indicativamente, per i rulli gommati sono necessari di norma 30 passaggi, mentre per quelli misti o solo metallici (vibranti) 20 passaggi. È, inoltre, assolutamente necessario vigilare affinché tutta la larghezza del riciclato sia compattata con la medesima energia e che i bordi non risultino deformati sotto il peso dei mezzi.

3.7 TECNICHE DI RICICLAGGIO A FREDDO: TIPOLOGIE DI TRENI

3.7.1 INTRODUZIONE

L'alta qualità delle attrezzature e le tecniche utilizzate, da sole, non sono sinonimo di garanzia di un lavoro eseguito a regola d'arte. Oltre ad un corretto studio di formulazione e scelta delle materie prime da adottare, la predisposizione delle macchine a costituire veri e propri "treni" rappresenta un fattore fondamentale da considerare nell'approccio al riciclaggio a freddo in sito, insieme a tutti gli aspetti logistici. Si possono individuare due tipologie di treni, detti rispettivamente single e multi unit, che si differenziano sostanzialmente per la presenza in un caso di una riciclatrice-finitrice nell'altro di una fresa e di una finitrice.

3.7.2 SINGLE UNIT

Questo tipo di “treno” ha la seguente composizione:

- al centro:
 - macchina mescolatrice e riciclatrice (uno o due componenti);
- anteriormente:
 - cisterna per l’emulsione bituminosa;
 - automezzo spanditore;
 - cisterna per l’acqua;
- posteriormente:
 - macchina livellatrice;
 - rullo vibrante
 - rullo gommato

I treni di riciclaggio possono avere configurazioni diverse a seconda del tipo di applicazione e al tipo di stabilizzante impiegato. In tutti i casi, comunque, la riciclatrice funge da locomotiva e spinge o tira l’attrezzatura ad essa collegata mediante barre di spinta o di traino. Le figure seguenti illustrano alcuni esempi di comuni treni di riciclaggio.

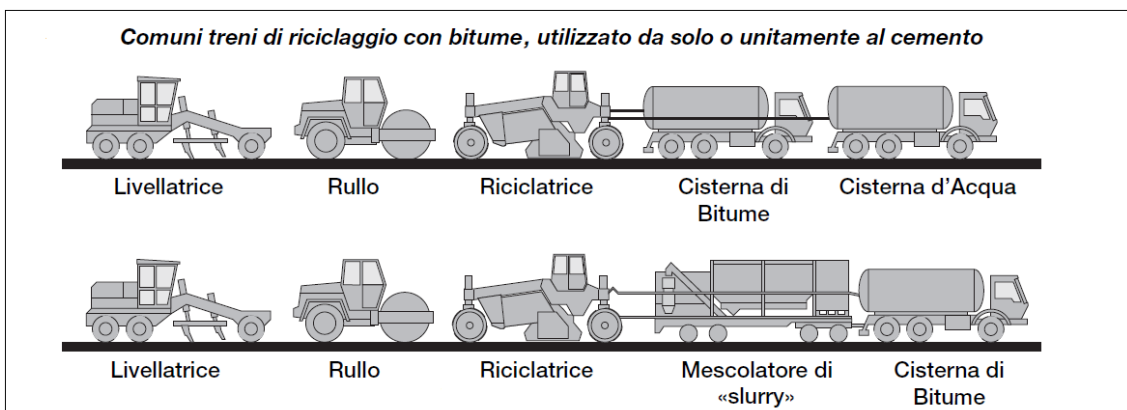


Figura 3. 18: Treni di riciclaggio con bitume, utilizzato da solo o unitamente a cemento

In quei casi in cui si utilizza soltanto il bitume, come accade per il riciclaggio di una pavimentazione composta da asfalto e/o pietrisco di buona qualità, la riciclatrice spinge in avanti due cisterne: dapprima una cisterna contenente bitume a caldo, quindi una cisterna d'acqua (immagine superiore). Una volta riciclato, il materiale è soggetto ad una prima passata di un rullo compressore che lo consolida. Di seguito, viene profilato da una moto livellatrice prima di essere costipato da un rullo vibrante. Qualora, invece, il bitume venga impiegato insieme al cemento, quest'ultimo può essere aggiunto sotto forma di «slurry», mediante l'apposito mescolatore collocato dinanzi alla riciclatrice con la cisterna dell'emulsione alla testa del treno (immagine inferiore), oppure cosparso a mo' di polvere sulla superficie stradale preesistente nella parte antistante il treno di riciclaggio, collegando la cisterna di bitume direttamente alla riciclatrice e la cisterna d'acqua in testa al treno, come nel caso di trattamento con sola emulsione. Una volta riciclato, il materiale è soggetto ad una prima passata di un rullo compressore che lo consolida. Di seguito, viene profilato da una moto livellatrice prima di essere costipato da un rullo vibrante.

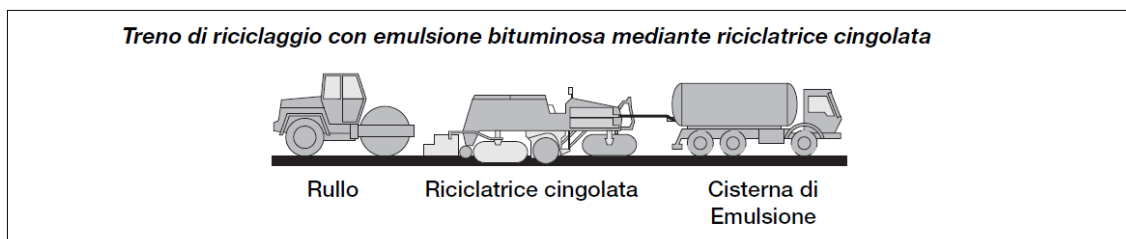


Figura 3. 19: Treno di riciclaggio con emulsione bituminosa mediante riciclatrice cingolata

Quanto detto vale a proposito di riciclatrici gommate. Quando si esegue il riciclaggio superficiale in quei casi in cui la pavimentazione preesistente è composta da spessi strati di asfalto e il riciclaggio viene compiuto nell'ambito dello spessore dell'asfalto, si impiegano solitamente riciclatrici cingolate e il treno di riciclaggio viene solitamente configurato come illustrato in Figura 3. 19. Qualora la riciclatrice sia munita di una pavimentatrice-livellatrice, l'utilizzo di una moto-livellatrice per profilare la superficie

potrebbe risultare superfluo. I vantaggi di questo metodo risiedono nell'alta capacità di produzione e nella semplicità delle operazioni, inoltre la ridotta lunghezza del treno di riciclaggio lo rende compatibile anche per interventi in aree urbane. Di contro, le principali limitazioni della tecnica consistono nella profondità raggiungibile e nel controllo della granulometria risultante dalla fresatura.



Figura 3. 20: Particolare del treno: la riciclatrice spinge le cisterne ausiliarie

Le macchine mescolatrici e riciclatrici (Figura 3. 20) sono il cuore del treno produttivo. Al loro interno è posizionata una camera di fresatura e miscelazione composta a sua volta da una fresa che sgretola ulteriormente il manto stradale; sono presenti ugelli autopulenti di spruzzatura, sia per i leganti (emulsione bituminosa o bitume espanso) che per acqua e cemento (alcune soluzioni prevedono che il cemento possa essere distribuito a secco sul manto stradale). In questa camera (Figura 3. 21) il materiale fresato è spinto verso l'alto dove incontra i vari tipi di legante opportunamente dosati; ricade sul tamburo o rotore di fresatura, che per effetto del suo movimento rotatorio ne impasta e mescola i componenti, riposizionandoli sulla pavimentazione appena fresata.

Un sistema di controllo a microprocessore permette il controllo e la gestione dei corretti dosaggi d'acqua, emulsione bituminosa, bitume e cemento, in modo da assicurare costantemente la rispondenza ai requisiti richiesti.

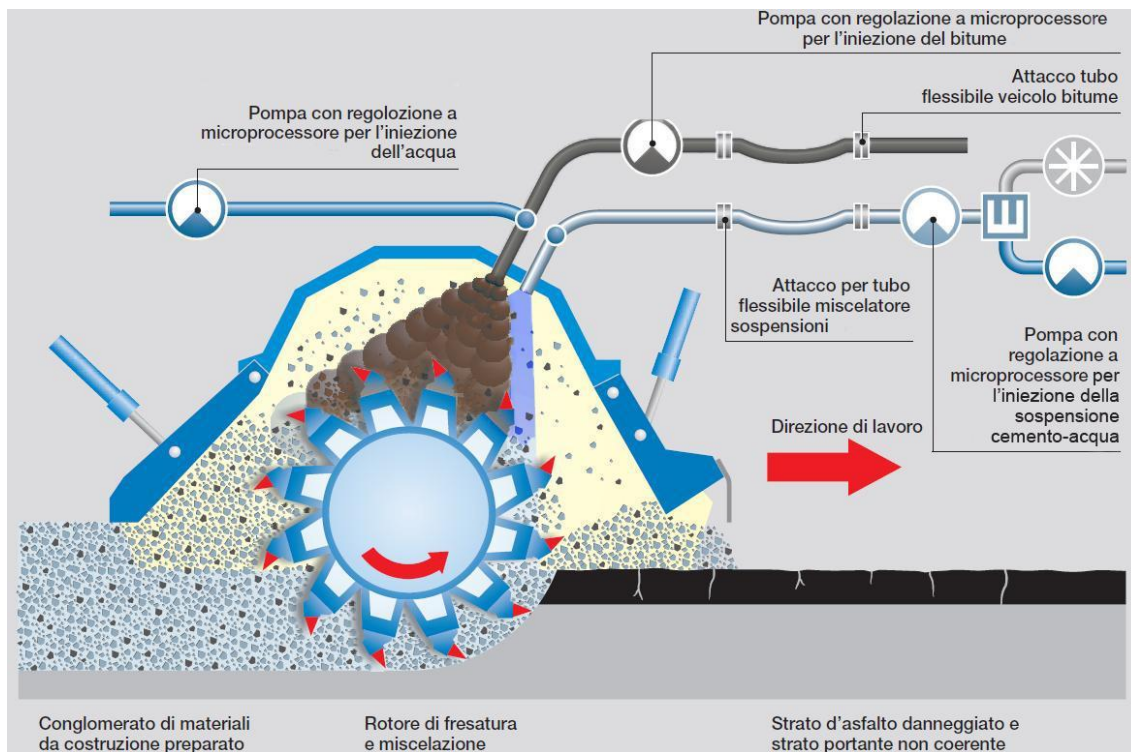


Figura 3. 21: Schema del processo di riciclaggio a freddo con emulsione e distribuzione di cemento

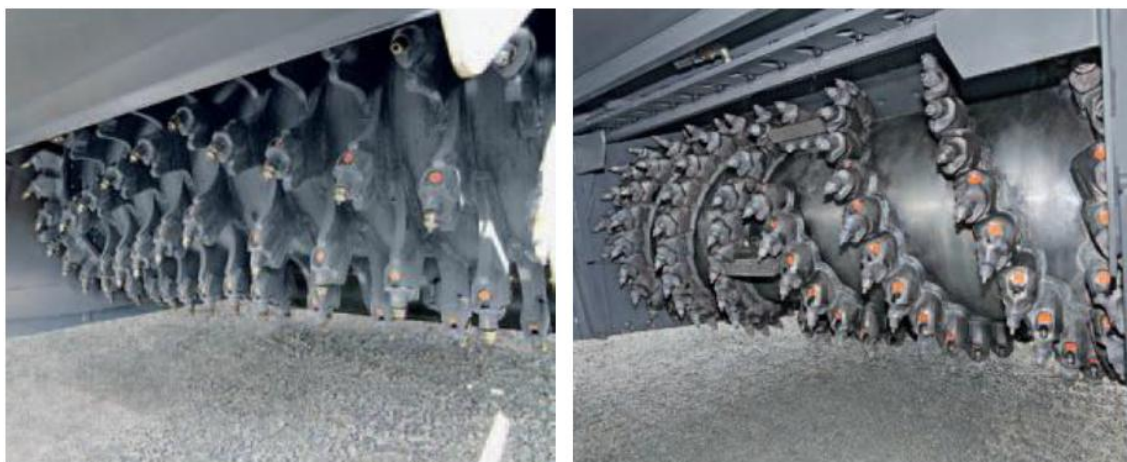


Figura 3. 22: Rotore di una riciclatrice gommata (sinistra) e cingolata (destra).

Esiste una sostanziale differenza tra i rotori fresanti delle riciclatrici gommate e fresate (Figura 3. 22). La configurazione delle punte fresanti di un rotore di una riciclatrice

gommata (a sinistra nella figura) promuove un' azione di mescolamento nel piano verticale, ma non in quello orizzontale, secondo test che valutano il suo massimo scostamento dalla posizione originaria pari a 200mm, riflettendo le differenze iniziali dopo la ricaduta sul manto del materiale fresato. Il rotore di questo tipo di macchine deve inoltre prima penetrare nel sostrato del materiale legato, per esempio asfalto, per polverizzarlo efficacemente. È inoltre possibile variare la distanza del rotore dall'estremità superiore del suo alloggiamento in modo tale da poter agire sul volume trattabile di materiale in base alle esigenze del caso, permettendone un efficace utilizzo per grandi profondità di trattamento.



Figura 3. 23: Riciclatrice cingolata con banco di stesa adattato

Le punte fresanti delle riciclatrici cingolate (a destra in Figura 3. 22) sono disposte invece secondo una configurazione a elica che convoglia il materiale verso il centro del rotore. Contrariamente al caso precedente l'azione rimescolante promossa da questa configurazione promuove il rimescolamento del materiale proveniente da ognuna della due metà del rotore. Invece di essere sollevato e rimosso da un nastro trasportatore come accade quando si fresa, il materiale recuperato esce attraverso un'apertura nella zona posteriore della camera di fresatura e passa tra i cingoli per essere stesa sulla larghezza di intervento tramite un banco di stesa accoppiato alla macchina (Figura 3. 23 e Figura 3. 24). Queste riciclatrici sono progettate e costruite per assicurare stabilità durante il trattamento di spessi strati di asfalto, senza quindi la necessità di penetrare lo strato sottostante quello legato su

cui si interviene, potendone eventualmente trattare anche solo la porzione superiore. Essendo però il rotore e la stessa camera in cui è collocato fissati al telaio della macchina il volume di materiale che può essere trattato è limitato, e questo restringe lo spessore che può essere riciclato a un massimo di 250mm, o meno ove sia previsto l'uso congiunto di stabilizzanti. Sono pertanto macchine ideali per riciclare materiali costituiti interamente di asfalto (100% RAP).

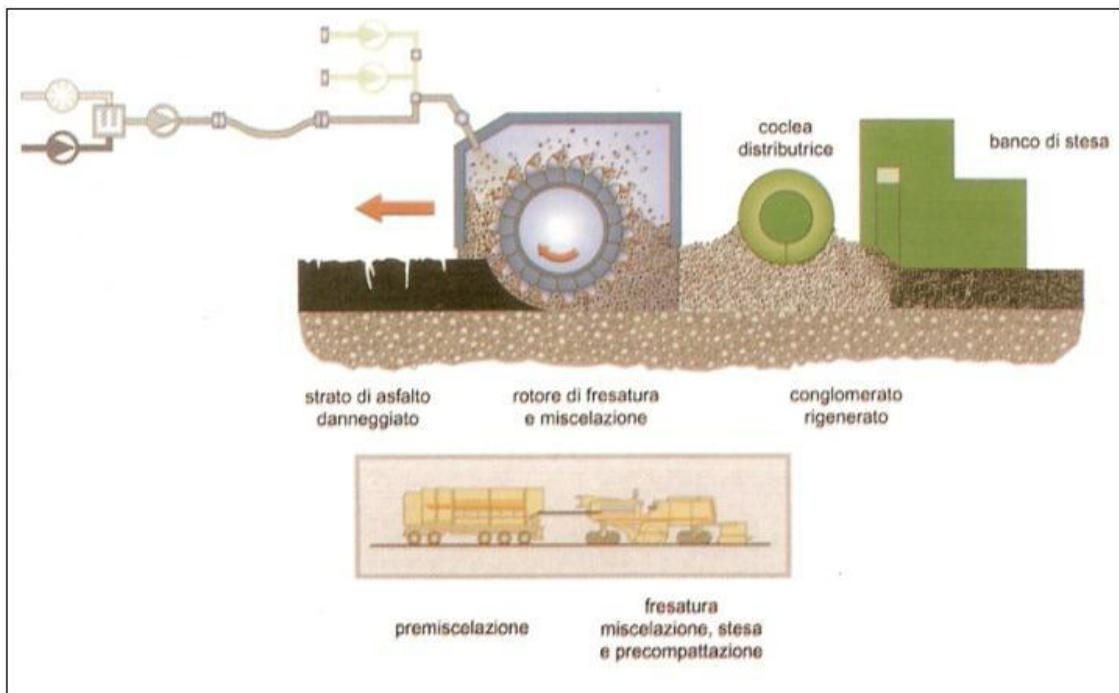


Figura 3. 24: Particolare del treno e schema con banco di stesa

3.7.3 MULTI UNIT

Il seguente tipo di treno (Figura 3. 25.a,b), atto a riciclare a freddo in sito, è composto dalle seguenti macchine:

- a) al centro:
 - macchina mescolatrice/riciclatrice;

- b) anteriormente:
 - fresa;
 - cisterna per l'emulsione bituminosa;
 - automezzo spanditore (se necessario);
 - cisterna per l'acqua (se necessaria);

- c) posteriormente:
 - finitrice;
 - rullo vibrante;
 - rullo gommato.

La produzione di fresato avviene attraverso una normale fresa a freddo, che asporta il manto stradale negli spessori desiderati e lo accumula al centro della carreggiata sotto forma di cordolo continuo.

La macchina mescolatrice esegue una serie di operazioni: trasporto del fresato con un nastro trasportatore nella parte alta della macchina, vagliatura del fresato (luce rete 40 mm) e frantumazione delle parti più grosse tramite un mulino, miscelazione del fresato, a mezzo di impastatrice continua a doppio albero, con i leganti e aggiunta di acqua. Il prodotto ottenuto viene prelevato da un elevatore a tazze che lo trasporta e deposita nella vibrofinitrice che lo stende.



Figura 3. 25: Foto di un treno di riciclaggio CMT 250 della MARINI (Pavimental Autostrade spa)

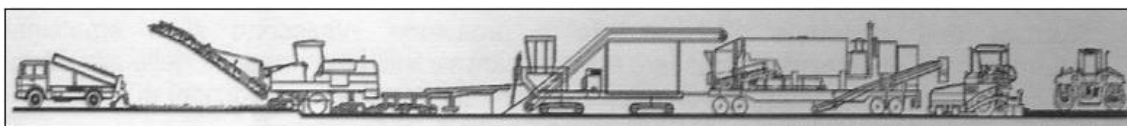


Figura 3. 26: Schema con dosatrice e mescolatrice a doppio albero

L'operazione successiva e di fondamentale importanza è la rullatura. Nel caso del primo treno, il materiale, dopo una veloce prima passata di rullo, deve essere livellato con un grader che permette di profilare correttamente l'asse stradale, a cui farà seguito la rullatura definitiva. In tutti e due i casi la prima passata deve essere fatta con un rullo vibrante con tamburo d'acciaio di massa non inferiore alle 15 t; questa rullatura dovrà essere necessariamente molto energica affinché si possa ottenere un certo consolidamento anche in profondità. I valori di densità ottimali previsti dal progetto sono ottenuti con la costipazione definitiva effettuata con la combinazione sia di rullo statico che gommato.

Nonostante i progressi registrati negli ultimi anni inerenti i macchinari e le tecnologie di riciclaggio a freddo in sito, sono ancora da preferire i treni del secondo tipo

piuttosto che quelli con le singole unità riciclatrici-finitrici. I motivi risiedono nel fatto che i primi sono formati da una serie di mezzi, ognuno dei quali è preposto a specifiche funzioni, e permettono pertanto un accurato controllo delle varie operazioni, mentre gli altri, essendo di dimensioni ridotte e avendo a disposizione una potenza limitata (vi è un unico propulsore per azionare tutti i sistemi), non possono svolgere in modo così accurato tutti i compiti. Nel caso di lavori di una certa importanza si preferisce impiegare treni del secondo tipo perché garantiscono migliore qualità al prodotto finito.

3.8 CONCLUSIONI

Nel processo a freddo la temperatura operativa è quella ambiente e quindi per ottenere un conglomerato bituminoso o stabilizzato di buona qualità è necessario:

- ottenere un conglomerato fresato il più vicino possibile alla curva di riferimento;
- utilizzare un legante bituminoso idoneo a temperatura ambiente;
- utilizzare additivi in grado di rigenerare il legante vecchio, ripristinando le proprietà perse a causa dell'invecchiamento e ottenere, al contempo, la viscosità desiderata;
- disporre di un legante di aggiunta sufficientemente stabile da consentire la riapertura del traffico nel più breve tempo possibile;

Inoltre affinché si possano avere dei risultati soddisfacenti delle caratteristiche della miscela, non è sufficiente un corretto utilizzo dei macchinari e dei materiali a disposizione ma è necessario uno studio preliminare in laboratorio. Solo attraverso un'analisi approfondita degli elementi che costituiscono la miscela, una valutazione dei tempi di reazione, dei dosaggi e delle temperature di maturazione è possibile ottenere conglomerati con caratteristiche meccaniche simili a quelle proprie di un conglomerato ottenuto con i metodi "tradizionali". Quindi prima di procedere all'esecuzione su strada della rigenerazione a freddo, si deve:

- valutare e conoscere le modalità operative delle macchine rigeneratrici impiegate;
- determinare le caratteristiche del conglomerato bituminoso fresato (percentuale di bitume, cemento, acqua, granulometria e classificazione del bitume);

- eseguire prove di caratterizzazione sul conglomerato bituminoso rigenerato.

Nella sperimentazione oggetto di studio sarà utilizzata la tecnica a freddo con emulsione e sulla base di quanto appena detto, verranno di seguito descritte le caratteristiche, le proprietà ed i ruoli di tutte le componenti della miscela.

CAPITOLO 4

RICICLAGGIO A FREDDO: ANALISI DELLA MISCELA

4.1 STABILIZZAZIONE CON EMULSIONE BITUMINOSA E CEMENTO

4.1.1 GLI ELEMENTI DELLA MISCELA

Per miscele riciclate a freddo si intendono, in ambito di pavimentazioni stradali, tutti quei conglomerati a base di emulsione di bitume, indipendentemente dalla loro ubicazione all'interno del pacchetto stradale, ottenuti dal recupero dei materiali di vecchie pavimentazioni stradali. Esse assumono prevalentemente un ruolo di strato base e/o di fondazione delle pavimentazioni.



Figura 4. 1: Principali elementi delle miscele impiegate nel riciclaggio di materiali stradali con emulsione bituminosa e cemento

Le miscele di riciclato a freddo con emulsione e cemento sono essenzialmente costituite dalle seguenti componenti in quantità variabili (Figura 4. 1):

- emulsione;
- cemento;
- aggregati;
- filler;
- additivi rigeneranti;
- acqua.

Nei prossimi paragrafi verranno descritte le caratteristiche fisiche e chimiche di tutti questi elementi. Saranno esaminati anche i rispettivi ruoli ed influenze nei confronti delle proprietà meccaniche della miscela confezionata.

4.2 L'EMULSIONE BITUMINOSA

4.2.1 DESCRIZIONE

L'emulsione bituminosa è una dispersione di bitume in acqua, stabilizzata con sostanze tensioattive anioniche o cationiche. Per ottenere tale dispersione, è necessario utilizzare energia meccanica di taglio.

Il bitume è reso fluido mediante dissoluzione in solventi, come nel caso di bitumi liquidi, o mediante processi di riscaldamento (Figura 4. 2).

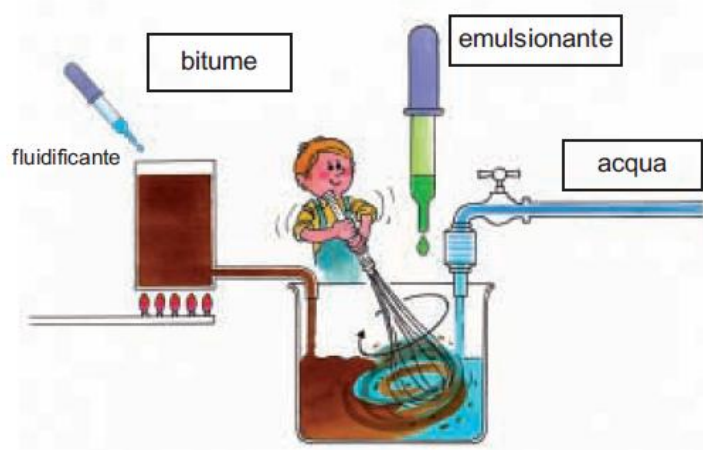


Figura 4. 2: Schema rappresentante la produzione di emulsione bituminosa

Scientificamente, un'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. Il suo maggiore pregio è quello di poter essere applicata a temperatura ambiente (anche se è poco opportuno impiegarla a temperature inferiori a 5°C); la sua viscosità è facilmente regolabile e penetra bene nei materiali, ai quali aderisce anche se sono umidi. Un'emulsione di bitume deve contenere anche degli agenti adeguati che favoriscono il mantenimento dell'equilibrio.

4.2.2 IL BITUME

Il bitume utilizzato in tecnica stradale è ottenuto industrialmente mediante la distillazione frazionata del petrolio. I greggi provenienti dal medio oriente sono le sorgenti principali anche se attualmente è normale considerare come qualitativamente superiori i bitumi provenienti da greggi venezuelani e lavorati con metodi classici di distillazione. Negli impieghi più frequenti il bitume appare come un liquido viscoso o un solido, essenzialmente costituito da idrocarburi la cui struttura è molto complessa. Si considera che esso sia formato da tre famiglie di costituenti che non corrispondono a entità chimiche ben definite, ma risultano da differenti processi di separazione:

- i carboidi e i carbeni (insolubili nel tetracloruro di carbonio);
- gli asfalteni (insolubili nel normale-eptano, composti molto complessi a struttura condensata);
- le resine e gli oli (solubili nei solventi sopra citati).

I due ultimi costituenti possono essere raggruppati sotto il nome di malteni. Poiché i carboidi e i carbeni sono presenti in quantità molto ridotta, facendo astrazione della loro presenza si può rappresentare il bitume come una dispersione di asfalteni negli oli, mentre le resine costituiscono il fattore di peptizzazione; gli oli si differenziano dalle resine per la possibile presenza di catene paraffiniche e anelli naftenici, mentre nelle resine è prevalente il carattere aromatico ed eterociclico.

Il bitume assolve la funzione di legante che trattiene insieme grani minerali di diversa forma e grandezza.

Il mantenimento di questo legame richiede che non vi sia distacco tra la pellicola di bitume e il singolo grano (adesione) e che non vi sia rottura all'interno della pellicola di bitume (coesione).

Una delle caratteristiche che lo contraddistingue è la termo dipendenza. Può, infatti, essere solido o semi-solido a temperatura ambiente ed essere liquefatto per semplice riscaldamento. La suscettibilità termica costituisce allo stesso tempo per il bitume un pregio ed anche un difetto, non consentendo allo stesso di conservare costanti le proprietà di coesione al variare della temperatura d'esercizio.

Da circa vent'anni a questa parte, in campo stradale, si assiste alla progressiva affermazione di nuovi bitumi capaci d'alte prestazioni detti "bitumi modificati" e perciò è valso l'uso, per distinguerlo, di chiamare il bitume non modificato "bitume tradizionale".

Per ciò che attiene i bitumi tradizionali per uso stradale, la normativa di riferimento, è la UNI EN 12591, riportata schematicamente nella Tabella 4. 1. Come si può facilmente osservare, la tabella prevede svariate gradazioni di bitume, espresse dall'intervallo dei valori della penetrazione a 25°C.

Specifiche C.E.N. per bitumi stradali													
(estratto dalla norma EN 12591/1999)													
Grado	Metodo EN	corrisp C.N.R.	unità di misura		20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
Caratteristiche fondamentali													
Penetrazione a 25°C	EN 1426	24/71	mm/10	min	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220	250-330
Rammollimento	EN 1427	35/73	°C	min	55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43	30-38
Punto di infiammabilità	EN 22592 (1)	72/79	°C	min	240	240	240	230	230	230	230	220	220
Solubilità	EN 12592	48/75	%	min	99	99	99	99	99	99	99	99	99
Resistenza all'invecchiamento:	EN 12607-1	54/77											
Variazione di peso	EN 12607-1	54/77	%	max	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	1	1
Penetrazione residua	EN 1426	24/71	%	min	55	53	53	50	50	46	43	37	35
Rammollimento dopo invecchiamento	EN 1427	35/73	°C	min	57	54	52	49	48	45	41	37	32
Caratteristiche Nazionali (2)													
Punto di rottura Fraass	prEN 12593	43/74	°C	max	-5	-5	-5	-7	-8	-10	-12	-15	-16
Resistenza all'invecchiamento:													
Variazione massima del rammollimento (3)	EN 1427	35/73	°C	max	10	11	11	11	11	11	12	12	12

Tabella 4. 1: Specifiche UNI EN 12591 per bitumi stradali.

Il mercato italiano, preferisce le gradazioni la 50/70 e la 70/100 per le pavimentazioni stradali.

Con le Norme Europee EN si sono mossi, senza dubbio, passi in avanti rispetto alle vecchie Norme C.N.R., soprattutto in virtù della maggiore attenzione al fenomeno dell'invecchiamento del bitume (prova RTFOT) strettamente collegata alla vita utile del conglomerato. Il tentativo di valutare, in senso prestazionale, la qualità del bitume è tuttavia affidato alla reologia, in altre parole allo studio sistematico del comportamento del bitume (moduli, deformabilità, ecc.) in relazione alla variazione della temperatura e alle modalità di applicazione dei carichi.

Un bitume modificato si differenzia da uno tradizionale soprattutto per quanto riguarda:

- la penetrazione a 25°C;
- il punto di rammollimento (Palla & Anello);
- la viscosità a diverse temperature.

Tuttavia, bisogna ricordare che il parametro “viscosità” non è prescritto né dalla vecchia normativa C.N.R., né dall'attuale normativa CEN; penetrazione e punto di rammollimento sono, invece, sempre indicati e sono valori basilari che devono essere noti e determinati, soprattutto in vista di un riciclaggio del conglomerato bituminoso.

Il bitume modificato viene ottenuto nell'ambito di un processo controllato (chimico e/o meccanico), dalla miscelazione di un idoneo bitume di base (bitume pro-modifica) con compatibili polimeri modificanti. Il legante ottenuto dal procedimento ha modificato il suo comportamento reologico e la suscettività termica in forma sostanziale, assimilando gradualmente le caratteristiche dei polimeri aggiunti.

A differenza dei bitumi tradizionali, le specifiche europee per i bitumi modificati sono ancora in discussione e non ancora ufficializzate dal CEN.

SPECIFICHE TECNICHE PER L'INDIVIDUAZIONE E LA SCELTA DEI BITUMI MODIFICATI (valide per condizioni climatiche normali nell'area mediterranea)						
Classi di riferimento bitumi	Classe 1 10/30 - 70	Classe 2 30/50 - 65	Classe 3 (*) 50/70 - 65	Classe 4 50/70 - 60		
	-pavimentazioni ad alto modulo		-tappeti d'usura drenanti e fonoassorbenti	-conglomerati tradizionali migliorati	Metodo d'analisi	
Applicazioni tipiche suggerite	-conglomerati alto modulo per strato di base e di collegamento	-conglomerati alto modulo per strato di base e di collegamento	-tappeti anti-sdrucchiolo (split mastix asphalt, grenu e semigrenu)	-tappeti anti-sdrucchiolo (split mastix asphalt, grenu e semigrenu)		
Tipologia di strade e condizioni di traffico	-strade extraurbane principali e secondarie -piazze portcontainers -piste aeroportuali	-strade urbane, extraurbane principali e secondarie	-manti ultrasottili -conglomerati chiusi ad alte prestazioni	-conglomerati aperti		
	Traffico molto pesante lento	Traffico medio pesante	Traffico medio veloce	Traffico medio veloce		
Penetrazione a 25°C (dmm)	10/30	30/50	50/70	50/70		CNR24/71
Punto di rammolimento P&A (°C)	≥70	≥65	≥65	≥60		CNR35/73
Punto di rottura Fraass (°C)	≤-6	≤-8	≤-15	≤-12		CNR43/72
Viscosità dinamica a 160 °C (mPa x s)	≥600	≥400	≥400	≥250		ASTM D4402
Ritorno elastico a 25°C (%)	≥50	≥50	≥75	≥50		DIN 52013
Stabilità allo stoccaggio D pen (dmm) e P&A (°C)	≤5	≤5	≤5	≤5		EN 13399
Invecchiamento (RTFOT) (variazione di P&A in °C)	+/- 5	+/- 5	+/- 5	+/- 5	CNR54/77	
Invecchiamento (RTFOT) (penetrazione residua %)	≥60	≥60	≥60	≥60	CNR54/77	
Coesione a +5°C (J/cm ²)	≥5	≥5	≥5	≥5	Pr EN 14023	
(*) Per bitumi modificati con plastomeri il valore di ritorno elastico potrà essere inferiore al 75% ma maggiore di 50% e la viscosità maggiore di 300 mPa x s.						

Tabella 4. 2: Specifiche tecniche del SITEB.

Il SITEB ha prodotto, per ovviare a tale mancanza, una tabella di specifiche tecniche (che contiene anche il parametro “viscosità” a 160°C) che identifica 4 classi di bitume modificato adatte alle diverse tipologie di strade e di traffico, con indicati i valori minimi affinché le prestazioni richieste siano garantite.

La Tabella 4. 2, riporta le specifiche tecniche suggerite dal SITEB, per l'individuazione e la scelta dei bitumi modificati valide per condizioni climatiche normali nell'area mediterranea.

4.2.3 LE ALTRE COMPONENTI DELL'EMULSIONE

Oltre al bitume, che conferisce le principali caratteristiche fisiche e meccaniche all'emulsione, le altre componenti di rilevante importanza sono: emulsionanti, acqua e fluidificanti. Gli emulsionanti sono prodotti chimici classificabili in base al loro comportamento di dissociazione in acqua, che prima favoriscono la dispersione di bitume in acqua, poi, dopo la rottura, favoriscono l'adesione del bitume agli inerti. 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 quindi affinità chimica con l'acqua;
- Una catena idrocarburica apolare $\text{R} = \text{CH}_3(\text{CH}_2)_n$ che gli conferisce proprietà lipofile (idrofoba) cioè affinità con i grassi ovvero con il bitume;

L'emulsionante si orienta con la parte idrofoba immersa nella fase dell'olio bituminoso, mentre la testa del gruppo, in contrapposizione alla coda, resta in contatto con la fase acquosa. La natura del gruppo idrofilo governa il meccanismo della stabilizzazione. Gli emulsionanti con porzioni idrofile estese possono prevenire il contatto delle goccioline bituminose semplicemente grazie alle loro proprietà di riempimento dello spazio (repulsione sterica). I gruppi idrofili inoltre possono adottare una carica in acqua inducendo una repulsione elettrica tra le particelle di bitume.

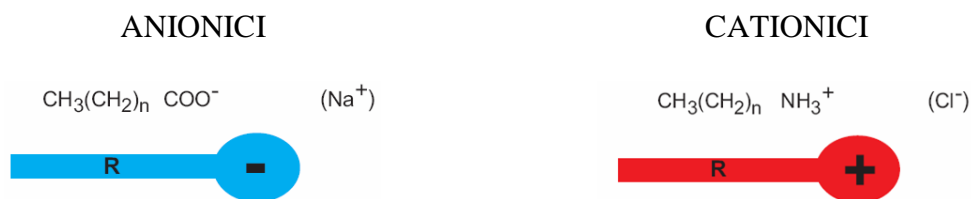


Figura 4. 3: Schema delle emulsionanti

Gli emulsionanti si distinguono in anionici, cationici e non ionici in dipendenza della carica che i loro gruppi polari tendono ad assumere. Il segno di questa carica dipende dal pH dell'emulsione e determina la carica delle gocce di bitume, sebbene il bitume in sé contenga gruppi chimici ionizzabili che contribuiscono alla carica delle particelle. La dimensione ed il segno della carica delle gocce può essere misurato ed espresso attraverso il "potenziale zeta" (misura della densità di carica superficiale). Gli emulsionanti solitamente impiegati nel campo stradale sono: anionici (sapori di acidi grassi) e cationici (ammine o sali di ammonio), possono essere rappresentati attraverso la Figura 4. 3.

Esiste anche un terzo tipo di emulsionante molto meno utilizzato denominato "non ionico o Anfolitico" che è generalmente costituito da proteine o amminoacidi e che manifesta la polarità in base alle condizioni del mezzo (pH).

Poiché gli emulsionanti sono insolubili in acqua è indispensabile trasformarli in "sapori" per permettere 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.

La scelta dell'emulsivo influenza la dimensione delle particelle ottenute, più alta è la sua concentrazione, più piccole risultano le goccioline di bitume. Generalmente si utilizza un quantitativo di emulsivo superiore a quello strettamente necessario per ottenere una buona stabilità e per rivestire completamente l'interfaccia bitume-acqua (Figura 4. 4); in questo modo l'emulsione può contenere dell'emulsionante libero o sotto forma di micelle in soluzione nella fase acquosa. Questo agisce da riserva di emulsivo prevenendo la coalescenza durante la produzione, stoccaggio e trasporto della emulsione.

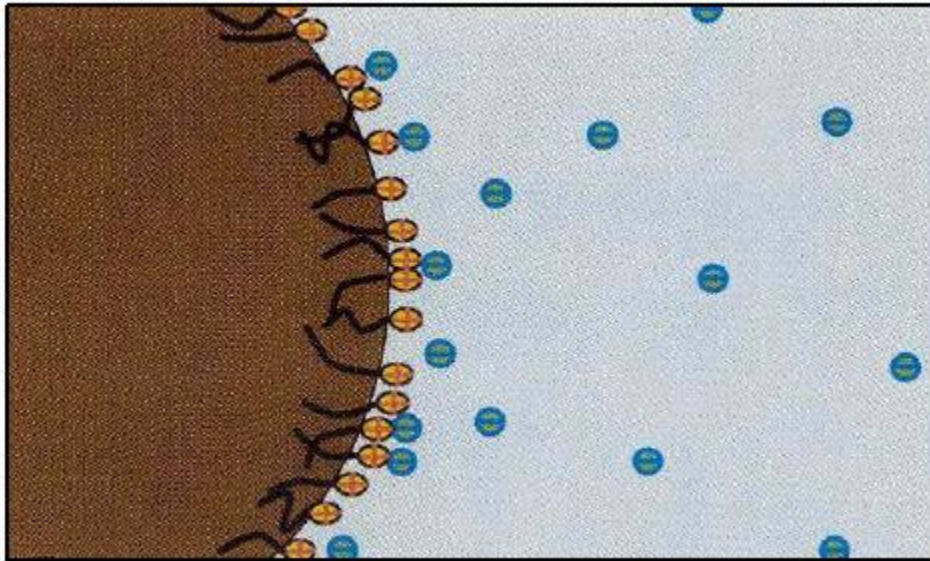


Figura 4. 4: Interfaccia bitume-acqua con particelle di emulsivo

L'adsorbimento dell'emulsivo da parte della superficie delle gocce di bitume genera quindi una repulsione elettrica oppure una repulsione sterica che funge da barriera tra le particelle e di conseguenza aiuta a prevenire il loro avvicinamento e ricongiungimento. In ogni caso, anche se tale energia fosse sopraffatta e le particelle flocculassero, l'emulsionante ne inibirebbe la coalescenza (Figura 4. 5).



Figura 4. 5: Condizione in può trovarsi un'emulsione

L'acqua scelta non deve contenere né impurità organiche né minerali; per la produzione delle emulsioni, si utilizza in generale acqua di pozzo o di acquedotto anche se qualche volta è necessario “permutare” l'acqua mediante un apparecchio appropriato, per renderla di durezza adeguata. La permutazione consiste nel sostituire alcuni ioni contenuti nell'acqua con altri.

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

4.2.4 PROPRIETÀ DELLE EMULSIONI

Le proprietà dell'emulsioni bituminose si distinguono in due gruppi. Il primo è rappresentato dalle proprietà intrinseche cioè quelle che non dipendono dalle sostanze minerali con le quali vengono utilizzate e sono la viscosità e la stabilità allo stoccaggio. La velocità di rottura e l'adesione fanno parte del secondo gruppo detto delle proprietà estrinseche, esse sono legate al loro comportamento nei diversi campi di impiego.

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 e la granulometria dei globuli di bitume e il processo di fabbricazione.

Nel campo stradale la viscosità ha una notevole valenza pratica in quanto 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 trattamento superficiale. Una troppo viscosa impedirebbe la penetrazione in profondità nel caso di "impregnazione" su strada bianca.

La *stabilità* impedisce la separazione dell'emulsione nei suoi costituenti. Un fattore determinante tale proprietà 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.

La *velocità di rottura* è il modo rapido o lento in cui avviene il fenomeno elettrofisico per il quale il bitume si separa dall'acqua. La "rottura" delle emulsioni di bitume è una proprietà fondamentale oggetto di numerose teorie scientifiche.

È un 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).

Il fenomeno che segue la coagulazione e che si verifica quando l'emulsione è in contatto con l'aggregato è la presa. 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 oramai totalmente anidro, disperde anche le frazioni leggere in esso contenute, "l'ammorsamento" è completo, il legante che rimane è costituito da solo idrocarburi non volatili (Figura 4. 6).

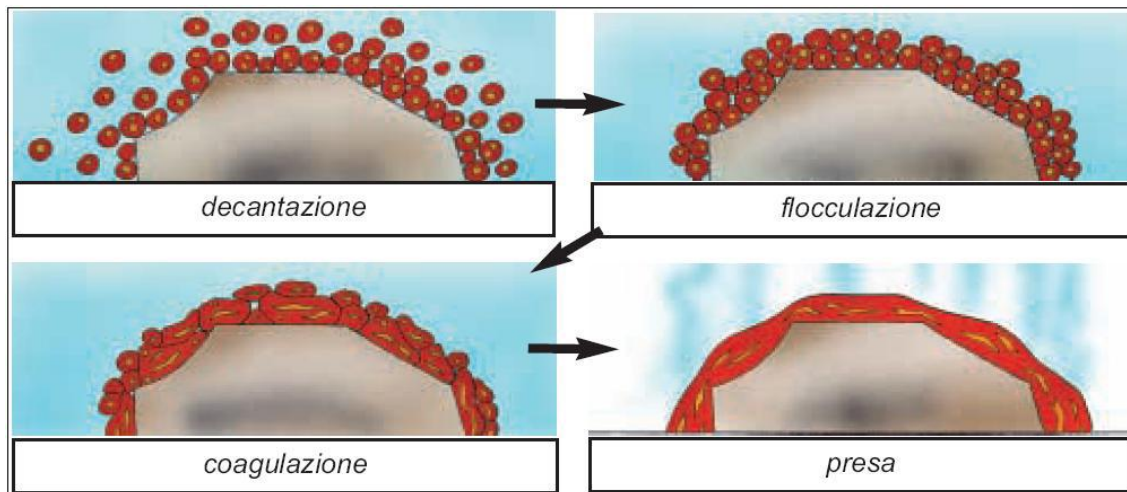


Figura 4. 6: Schema del Processo di Rottura e Presa

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).

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 perturbativi (es. polvere). L'adesività della coppia bitume aggregato si può spiegare schematicamente nel modo seguente.

In presenza di materiale lapideo avente caratteristiche alcaline (calcare), con un'emulsione cationica si verifica una reazione tra tale materiale calcareo e l'emulsionante con formazione di un "carbonato di ammina" insolubile. Se l'emulsione è anionica ho un'attrazione dei globuli di bitume caricati negativamente con formazione di un "sapone di calcio" insolubile.

Quando il materiale lapideo utilizzato ha caratteristiche acide (silice, quarzite, graniti, porfidi), introducendo un'emulsione cationica si genera un'attrazione dei globuli di bitume caricati positivamente, e formazione di un "silicato di ammina" insolubile. Con emulsione anionica non si verifica alcun fenomeno di attrazione ne alcuna reazione, cioè non c'è adesione.

4.2.5 LE EMULSIONI ANIONICHE

Sono emulsioni bituminose basiche con carica negativa ottenute con tensioattivi o emulsivi anionici cioè costituiti da sali alcalini ottenuti per saponificazione di grassi animali o di resine liquide con soda caustica.

La formula generale di questi saponi è $R^-COO^-Na^+$ dove R è la catena caratteristica dell'acido grasso e costituisce la parte apolare. In soluzione nella fase acquosa continua, le molecole di sapone si ionizzano: gli ioni Na^+ costituiscono dei “cationi” dispersi nell'acqua, il resto delle molecole costituiscono gli “anioni” adsorbiti dai globuli di bitume (Figura 4. 7).

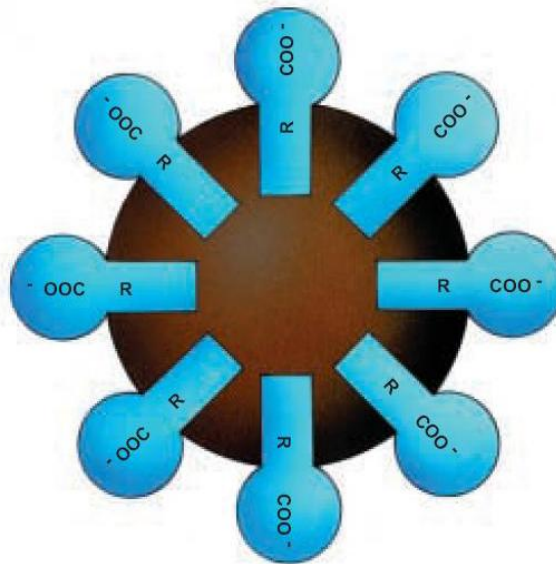


Figura 4. 7: Schema di Emulsione Anionica

In campo stradale, l'impiego delle emulsioni anioniche è limitato alle mani d'attacco in alcune aree geografiche del centro e sud Italia, caratterizzate da situazioni ambientali favorevoli e dalla disponibilità di aggregati di adeguata affinità chimica (calcarei). Generalmente sono abbastanza semplici da produrre, relativamente meno costose e anche assai meno performanti.

La Tabella 4. 3 riporta la classificazione e le proprietà delle emulsioni basiche secondo le norme CNR:

caratteristiche	A rapida rottura			A media rottura		A lenta rottura	
	ER50	ER55	ER60	EM55	EM60	EL55	EL60
1. composizione							
a) contenuto in peso di bitume puro, %min	50	55	60	55	60	55	60
b) contenuto in peso di emulsivo secco e di stabilizzante, % max	1	1	1	2	2	2.5	2.5
2. caratteristiche fisiche							
a) indice di rottura		>0.9		0.5-0.9		<0.5	
b) trattenuto al setaccio con tela 0.4 UNI2331, % max	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
c) omogeneità, % max	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
d) sedimentazione:							
a 3 g, mm max	4	4	4	4	4	4	4
a 7 g, mm max	10	10	11	10	10	10	10
e) stabilità a 7 g, % max	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
f) stabilità a 2 mesi, % max	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
g) stabilità al gelo, % max	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
h) viscosità Engler a 20°C:							
min, °E	2.5	4.5	6	4.5	6	4.5	6
max, °E	15	15	18	15	18	15	18
i) adesione minima:							
provini asciutti, Kg/cm ²	3	3	3	3	3	3	3
provini bagnati, Kg/cm ²	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
3. caratteristiche del legante estratto							
a) penetrazione a 25°C max ,1/10 mm	200	200	200	200	200	200	200
b) duttilità a 25°C min, cm	70	70	70	70	70	70	70
c) solubilità in CS ₂ min, %	99	99	99	99	99	99	99
d) punto di rammollimento max, °C	42	42	42	42	42	42	42
e) punto di rottura max, °C	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14

Tabella 4. 3: Classificazione e Proprietà delle Emulsioni Anioniche

4.2.6 LE EMULSIONI CATIONICHE

Per fabbricare questo tipo di emulsioni si utilizzano emulsionanti costituiti da molecole la cui formula può essere schematizzata nel modo seguente: $R'-NH_3^+Cl^-$.

R' è la catena idrocarburica caratteristica del tensioattivo; in soluzione acquosa le molecole di sapone si ionizzano producendo cationi $R'-NH_3^+$ e anioni Cl^- .

Durante la fabbricazione i cationi sono adsorbiti dalle particelle di bitume con la parte liofila R' rivolta verso l'interno, il gruppo NH_3^+ si colloca all'interfaccia bitume-acqua e gli anioni Cl^- restano nell'acqua (Figura 4. 8).

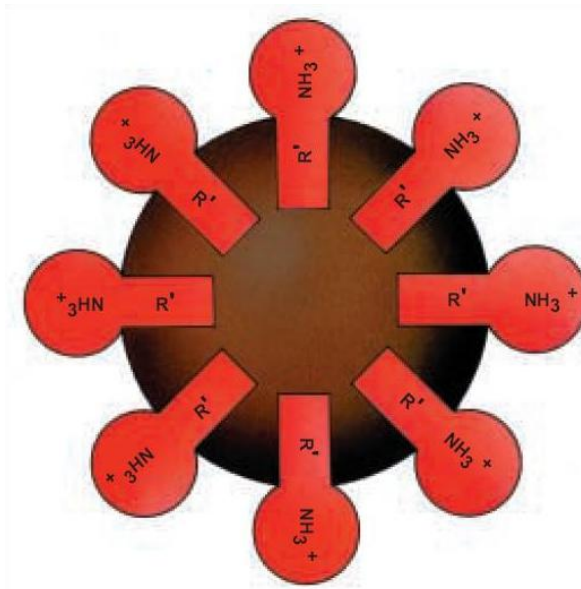


Figura 4. 8: Schema di Emulsione Cationica

Per via della pellicola di gruppi NH_3^+ che si è formata sulla superficie, le particelle di bitume si trovano cariche positivamente. Questo assicura da una parte la stabilità 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. La classificazione e le proprietà delle emulsioni acide secondo la

proposta SITEB, sulla base della velocità di rottura e del contenuto di bitume, sono riportate nella Tabella 4. 6 a fine paragrafo. Un confronto tra i due tipi di emulsioni bituminose descritte è invece contenuto nelle seguenti Tabella 4. 4 e Tabella 4. 5, vertenti rispettivamente sulle caratteristiche generali delle due emulsioni e sull’affinità di queste con l’aggregato, in relazione alla sua natura.

Classes of Bitumen Emulsion		
Bitumen Emulsion Type	Anionic	Cationic
Emulsifier type	Fatty acid or resin acid	Amine
Bitumen emulsion charge	Negative	Positive
pH	High (alkali)	Low (acid)
Grades	Stable mix (slow set) for recycling/stabilising	

Tabella 4. 4: Caratteristiche Generali delle Emulsioni Anioniche e Cationiche

Bitumen emulsion type/aggregate type compatibility			
Emulsion Type	Aggregate (Rock) Type	Trends	
		Breaking rate	Adhesion
Anionic	Acidic	Slow	Poor
Anionic	Alkaline	Medium	Good
Cationic	Acidic	Fast	Excellent
Cationic	Alkaline	Fast	Good

Tabella 4. 5: Affinità delle Emulsioni Anioniche e Cationiche con Aggregati di Diversa Natura

Prove di accettazione	Metodo di prova	A rapida rottura		A media rottura		A lenta rottura	
		ECR 55	ECR 65	ECM 55	ECM 60	ECL 55	ECL 60
<u>Composizione</u>							
a) contenuto d'acqua, % in peso	CNR 101/84	max 45	max 35	max 40	max 35	max 45	max 40
b) contenuto di legante (bitume + flussante), % in peso	CNR 100/84	min 55	min 65	min 60	min 65	min 55	min 60
c) contenuto di bitume, % in peso (residuo alla distillazione)	ASTM D244/97	min 53	min 62	min 54	min 55	min 55	min 60
d) contenuto di flussante, % in peso	ASTM D244/97	max 2	max 3	max 6	max 10	0	0
<u>Caratteristiche</u>							
a) velocità di rottura:							
- demulsività, % in peso	ASTM D244/97	>40	>40	-	-	-	-
- adesione, %	LCPC	>90	>90	-	-	-	-
- rivestimento aggregati acidi o basici:							
asciutti, %	ASTM D244/97	-	-	>80	>80	-	-
umidi, %	ASTM D244/97	-	-	>60	>60	-	-
- impasto con cemento o polvere silicea, g	ASTM D244/97	-	-	-	-	max 2	max 2
b) trattenuto al setaccio ASTM n°20, % in peso	ASTM D244/97	max 0.2	max 0.2	max 0.2	max 0.2	max 0.2	max 0.2
c) sedimentazione a 5 g, % in peso	ASTM D244/97	max 10	max 5	max 5	max 5	max 5	max 5
d) viscosità Engler a 20°C, °E	CNR 102/84	3-10	8-25	5-12	7-15	3-10	5-12
e) polarità delle particelle	CNR 99/84	posit.	posit.	posit.	posit.	posit.	posit.
<u>Caratteristiche del bitume estratto</u>							
a) penetrazione a 25°C, 1/10 mm	CNR 24/71	max 220	max 220	max 220	max 220	max 220	max 220
b) pto di rammollimento P.A., °C	CNR 35/71	min 35	min 35	min 35	min 35	min 35	min 35

Tabella 4. 6: Classificazione e Proprietà delle Emulsioni Cationiche

4.2.7 PRODUZIONE DELLE EMULSIONI DI BITUME

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 grado di finezza adeguato (mediamente 6-8 micron); tale azione è generalmente ottenuta mediante mulini colloidali o altre simili apparecchiature atte a creare un arricchimento progressivo della fase disperdente.

Durante il processo di produzione vanno continuamente monitorati i seguenti “parametri di produzione”.

L’*energia di dispersione* che è condizionata dall’energia meccanica apportata dal mulino, per frantumare il bitume in particelle fini, e dalla capacità 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).

Il secondo è *la viscosità e temperatura dei componenti*; affinché 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 quella che consente al bitume di frantumarsi con il minimo sforzo di taglio, e contemporaneamente, 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 (Tabella 4. 7):

Penetrazione (dmm)	Temperatura d'emulsione (°C)
160/220	140
70/100	150
35/50	160

Tabella 4. 7: Grado di Penetrazione del Bitume in Funzione della Temperatura

Nel caso di emulsioni da bitume modificato, occorrerà operare a temperature superiori.

La soluzione acquosa contenete sapone deve mantenere sempre una temperatura adeguata affinché l'emulsione, all'uscita dal mulino (che è alla pressione atmosferica), si trovi ad una temperatura inferiore a 95°C. Diversamente l'acqua si trasforma in vapore e crea una schiuma bituminosa.

L'ultimo è il dosaggio delle componenti che deve essere curato con grande precisione, in particolare quello degli emulsionanti e dell'acido: una variazione di questo, anche minima, può avere delle conseguenze importanti.

4.2.8 STOCCAGGIO E TRASPORTO DELLE EMULSIONI DI BITUME

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 di utilizzo. Lo stoccaggio in fusti, salvo rare eccezioni, non è oramai più adottato per ragioni pratiche ed economiche.

Dopo uno stoccaggio prolungato, si forma sulla superficie dell'emulsione, al contatto dell'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: quello della "sedimentazione" che si traduce in un aumento di tenore di bitume nell'emulsione nella parte bassa del serbatoio, oppure il fenomeno inverso detto "crematura" che si manifesta con aumento del tenore del bitume nella parte alta. Entrambi, se non portano ad una coagulazione dell'emulsione, non rappresentano un danno. È 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 rimescolamento 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 dell'antigelo, comunque, la cosa migliore e più semplice da fare è quella di riscaldare leggermente l'emulsione prima dell'utilizzo.

Per quanto riguarda il trasporto, diversamente dai bitumi allo stato liquido, l'emulsione di bitume non è un prodotto infiammabile e non figura tra i materiali pericolosi. I veicoli addetti al trasporto non sono soggetti ad alcuna segnalazione particolare (codice pericolo, codice materiale ed etichettatura), sono le stesse autocisterne destinate al trasporto dei bitumi allo stato liquido, caldi con capacità dei serbatoi che vanno da 1 a 28 m³. I mezzi che montano autocisterne da 1 m³ sono generalmente destinati ad alimentare le squadre di manutenzione in cantiere.

Per grosse capacità, è indispensabile dividere l'interno del serbatoio con delle paratie (Figura 4. 9) che durante il trasporto, assicurano una migliore stabilità del mezzo ed evitano un rimescolamento troppo violento che genera la formazione di schiuma.

Il carico e lo scarico dei serbatoi di emulsione si può fare per compressione e decompressione, in modo pratico e poco oneroso mediante una pompa e un compressore.



Figura 4. 9: Autocisterna per il Trasporto di Emulsione Bituminosa

4.3 RUOLO DELL'EMULSIONE

4.3.1 DEFINIZIONE

Il fine dell'emulsione è quello di fungere da legante (organico) e affinché possa assolvere tale ruolo si deve avere la rottura, l'acqua deve separarsi dalla fase bituminosa.

Il processo a seguito della rottura è il "curing" che determina uno sviluppo delle proprietà meccaniche del bitume presente e quindi la maturazione dell'emulsione. Alla fine si avrà una pellicola continua coesiva che trattiene gli aggregati attraverso un forte legame adesivo. Ciò si verifica quando l'acqua completa l'evaporazione e le particelle bituminose avvolgono completamente gli inerti.

L'evoluzione di questo processo è influenzata da alcuni importanti fattori:

- gli inerti porosi o a struttura scabrosa accelerano il tempo di messa in opera influenzando l'assorbimento dell'acqua;
- gli inerti asciutti vengono facilmente rivestiti, il curing può essere ritardato per l'umidità presente;
- la rottura avviene più velocemente alle alte temperature anche se questo non è sempre vantaggioso. Un clima caldo può provocare la formazione di una pelle sugli inerti superficiali che intrappola l'acqua e condiziona il curing;
- la pressione esercitata dal lento movimento dei mezzi, spinge l'acqua ad allontanarsi dalla miscela, favorendo la coesione, curing e la stabilità di questa;
- i filler accelerano la rottura o più in generale tutti quegli elementi con una maggiore superficie specifica;
- le cariche degli agenti emulsionanti in combinazione con le cariche superficiali degli inerti condizionano i processi di rottura e curing;

- se la temperatura degli inerti e dell'emulsione sono basse si verifica un ritardo della rottura.

Le prime emulsioni prodotte furono quelle di tipo anionico che a causa della incompatibilità elettrica con gli inerti silicei (che hanno carica negativa ed in presenza di umidità divengono elettronegativi) vennero sostituite, per questo tipo di utilizzo, da quelle cationiche. Queste ultime al contrario delle precedenti, sono affini elettronicamente agli inerti acidi e quindi tendono a legarsi con essi generando un processo di rottura prevalentemente chimico.

Al momento della miscelazione l'emulsione entra in contatto con gli inerti, il bitume è disperso nella fase acquosa dove si può solitamente trovare dell'emulsivo in eccesso, che avente carica superficiale positiva viene attratto dalla carica negativa della superficie degli inerti.

Successivamente anche i globuli di bitume, guidati dalla carica elettrica presente all'interfaccia bitume acqua, si depositano e non essendo più stabili flocculano ed aderiscono alla superficie degli aggregati. In conclusione entra in gioco l'evaporazione che però non influenza i processi appena visti (Figura 4. 10).

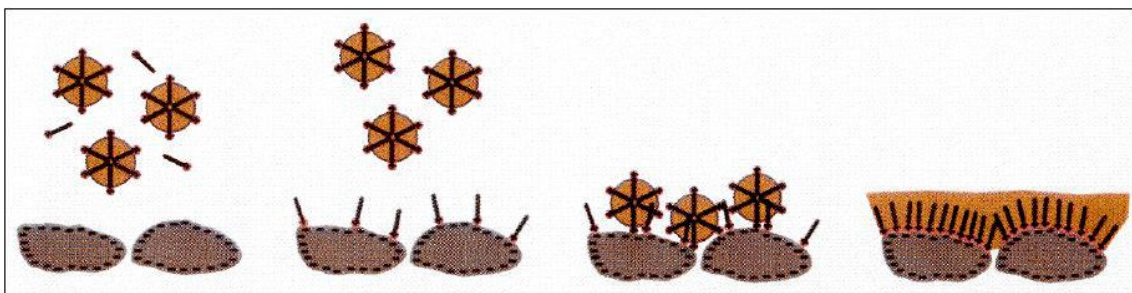


Figura 4. 10: Rottura e curig di un'emulsione cationica

4.3.2 INFLUENZA DEL TIPO E DEL DOSAGGIO DI EMULSIONE SULLE CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE E MECCANICHE DELLA MISCELA

Nel caso specifico delle emulsioni bituminose, sono nati prodotti per le applicazioni di riciclaggio che si differenziano tra loro per formulazione e tecnica di produzione. Essi possono influenzare in maniera determinante l'esito degli interventi di riciclaggio.

Due fondamentali fattori da considerare sono il dosaggio dell'emulsione all'interno della miscela e il dosaggio dei singoli costituenti dell'emulsione all'interno della stessa.

Partendo dal secondo punto, è già stato appurato nei capitoli precedenti come attualmente le emulsioni siano composte approssimativamente per un 60% in peso di bitume e per il restante 40% da fase acquosa. Nella fase acquosa è presente l'emulsivo, i cui dosaggi variano dallo 0.15% al 2.5% sul peso dell'emulsione.

Tra queste vi sono anche le emulsioni modificate che si dividono in due categorie: emulsioni modificate monofase ed emulsioni modificate bifase. Le prime sono caratterizzate da una fase dispersa composta da globuli di bitume modificato da plastomeri quali l'EVA (etilvinilacetato) o elastomeri come l'SBS (stirenebutadienestirene), mentre le altre sono caratterizzate da una fase dispersa composta sia da globuli di bitume che da goccioline di agente modificante che si presenta come una dispersione in acqua di polimeri naturali o sintetici di piccolissime dimensioni (in genere dal diametro inferiore ad 1 μm), come la gomma di lattice.

Sia le emulsioni modificate monofase che quelle bifase migliorano la coesione alle medio-alte temperature, migliorano le performance alle basse temperature, incrementano l'intervallo di elasto-plasticità ($IP=TR\&B - TFRAASS$), migliorano il comportamento all'invecchiamento ed il comportamento reologico in generale. I dosaggi degli agenti modificanti oscillano generalmente tra il 2,5% ed il 6% sul peso del bitume.

Oltre agli agenti modificanti, esistono pure gli agenti rigeneranti. Questi vengono accorpati o affiancati all'emulsione ed il loro scopo è rigenerare il bitume invecchiato presente nel RAP. Tali sostanze, dette anche ACF (agenti chimici funzionali) o ringiovanenti, sono ricche di quei componenti che il bitume invecchiato perde nel tempo a causa dell'ossidazione e dell'esposizione agli agenti atmosferici.

In pratica, gli agenti rigeneranti restituiscono quelle frazioni di cui è carente il bitume invecchiato cioè principalmente composti aromatici ma anche, in misura minore, resine e composti saturi, in modo da ribilanciare i rapporti tra le quattro famiglie di idrocarburi. Gli agenti rigeneranti presentano penetrazione elevata (anche maggiore di 300 dmm), alta duttilità (anche maggiore di 150 cm a 25°C) e bassi valori di temperatura Fraass (anche inferiore a -30°C) e palla-anello (anche inferiore a 35°C); con acqua realizzano un'emulsione che, nonostante i modesti dosaggi (2.5% in peso sul fresato), dovrebbe essere in grado di rigenerare il vecchio bitume.

Ad onor del vero alcuni autori criticano la validità degli agenti rigeneranti, perchè probabilmente queste sostanze funzionano quando le condizioni climatiche sono favorevoli e quindi le temperature elevate favoriscono l'adempimento al meglio del loro dovere.

Oltre alle elevate temperature (è dimostrato che gli ACF funzionano bene nel caso di riciclaggio a caldo), è necessario un lasso di tempo lungo affinché riattivino il vecchio legante (dopo circa un anno si può asserire che le proprietà meccaniche delle miscele riciclate a freddo con emulsioni a base di agenti rigeneranti siano comparabili con quelle delle analoghe miscele riciclate a caldo).

I conglomerati presi in esame in questo studio, dovendo rivestire il ruolo di fondazione della pavimentazione, debbono essere nel contempo flessibili (non fessurandosi alle basse temperature) e stabili (debbono cioè garantire adeguate resistenze meccaniche).

L'emulsione riveste un ruolo importante nella determinazione di queste due caratteristiche (anche se sembrerebbe avere un peso maggiore il cemento soprattutto per quanto riguarda le proprietà meccaniche).

Per determinare l'influenza della viscosità e della rigidità del residuo bituminoso sulle caratteristiche volumetriche e meccaniche si è fatto riferimento ad una pubblicazione di Santagata e Chiappinelli, datata 2001, in cui è stato analizzato il comportamento in laboratorio di quattro emulsioni non modificate (Tabella 4. 8), classificate in maniera estremamente semplice mediante la determinazione del contenuto d'acqua e di residuo bituminoso, nonché di alcune caratteristiche empiriche valutate su quest'ultimo.

Sono state 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.

	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 4. 8: Schema delle Caratteristiche delle Emulsioni

Esaminando le caratteristiche volumetriche, derivate dalle sperimentazioni, è interessante e confortante constatare che non ci sono rilevanti variazioni di queste proprietà in relazione alle caratteristiche delle emulsioni utilizzate. 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. La viscosità delle emulsioni è quindi un elemento che influenza questo aspetto. L'impiego di emulsioni aventi un residuo bituminoso più deformabile non garantisce a priori l'ottenimento di condizioni di più marcato addensamento. Piuttosto, si può facilmente vedere come, ad incidere sulla percentuale dei vuoti sia la tecnica di compattazione

utilizzata. L'impiego della pressa giratoria porta rispetto al caso di compattazione statica condizioni di addensamento caratterizzate da una maggiore massa volumetrica, da una più ridotta percentuale dei vuoti e da una riduzione, seppur modesta, della VMA. Sulla base dei dati ottenuti e dalle curve di addensamento, l'uniformità dei risultati dimostrano come nella fase di compattazione non vi siano stati comportamenti differenti delle emulsioni.

Le caratteristiche meccaniche, così come sintetizzate dai parametri riportati nella Tabella 4. 9 si sono rilevate estremamente sensibili rispetto 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.

	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 4. 9: Parametri caratteristici del modulo elastico E [MPa] delle miscele riciclate

Un'osservazione importante è stata fatta esaminando le variazioni del modulo iniziale $E_{iniziale}$ che sembra essere dipendente dalla consistenza del residuo bituminoso delle emulsioni. Ciò è dimostrato anche dall'andamento di Figura 4. 11, per semplicità hanno fatto riferimento alla penetrazione quale parametro di rigidità del residuo bituminoso dell'emulsione.

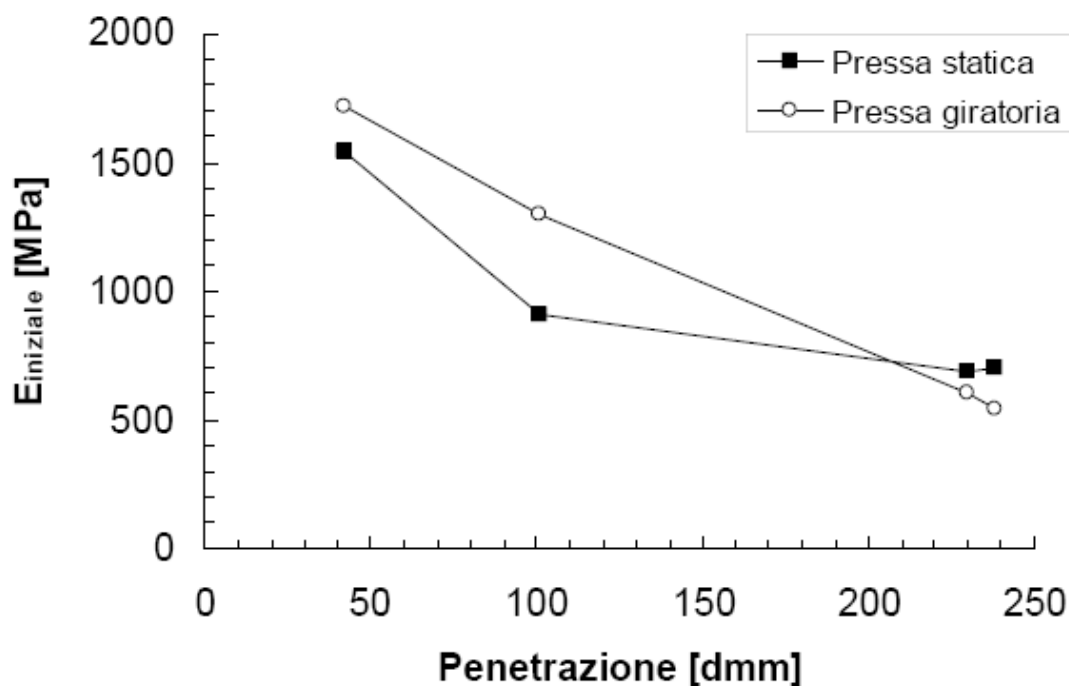


Figura 4. 11: Relazione tra Penetrazione del Residuo Bituminoso e Modulo Elastico Iniziale

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.

Anche per la resistenza a trazione indiretta si potrebbe individuare una correlazione con la penetrazione del residuo bituminoso dell'emulsione del tipo indicata nella Figura 4. 11. 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.

In conclusione, con emulsioni non modificate, per quanto riguarda le proprietà volumetriche, è la viscosità ad incidere sull'addensamento e la lavorabilità della miscela

mentre il residuo bituminoso non influenza in maniera significativa la percentuale dei vuoti del prodotto finale. Dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche, i moduli di elasticità iniziali sono più bassi quanto più alto è il grado di penetrazione del bitume dell'emulsione.

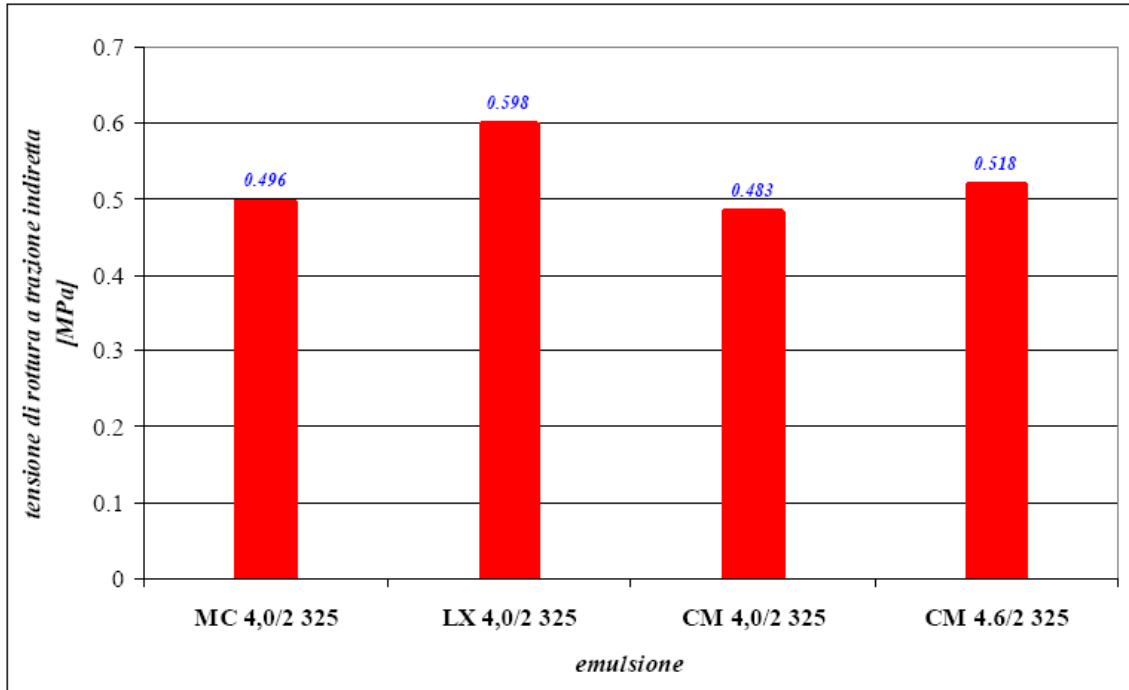


Figura 4. 12: Istogramma rappresentante la tensione a rottura a trazione indiretta per provini contenenti diversi tipi e percentuali di emulsione bituminosa

Differenze rilevanti e di maggiore interesse riguardanti le caratteristiche meccaniche sono state evidenziate in una ricerca sviluppata in collaborazione tra l'università di Parma e la Valli Zabban. Analizzando separatamente le prestazioni di emulsione di bitume distillato (MC), emulsione di bitume modificato (CM) ed emulsione di bitume distillato + lattice (LX). Dai risultati delle prove a trazione indiretta, è stato messo in evidenza che tutte le emulsioni bituminose impiegate nella sperimentazione risultano in grado di conferire agli impasti la necessaria resistenza richiesta da sovrastrutture stradali chiamate ad assolvere importanti carichi veicolari, raggiungendo il valore massimo con un'emulsione contenente lattice (Figura 4. 12). In particolare, si vede che con l'aumento dello 0,6% di emulsione nella miscela si ottiene un incremento del carico di rottura a trazione indiretta del 7,25%. Le

prove di fatica sono state eseguite alla temperatura di 25°C, dopo un condizionamento di quattro ore in cella climatica, sui campioni stagionati in forno a 40°C per 14 giorni e ricompattati con ulteriori 80 giri nella pressa giratoria. L'accorgimento di aver sottoposto ad una nuova compattazione le miscele già in uno stato di avanzata maturazione, ha permesso di tener conto, nell'analisi finale anche dell'azione del traffico al quale gli strati riciclati a freddo sono sottoposti prima del completamento della sovrastruttura di progetto. Sul campione è stato applicato un carico pari al 50% del carico di rottura ottenuto dalle prove di trazione indiretta ed i risultati delle prove a fatica (Figura 4. 13) mostrano come l'emulsione del tipo CM conferisca alla miscela una resistenza sensibilmente superiore alle emulsioni tradizionali, con dati che ne riconoscono come ingrediente essenziale per elevare le prestazioni in opera degli strati delle sovrastrutture riciclate a freddo in campo stradale.

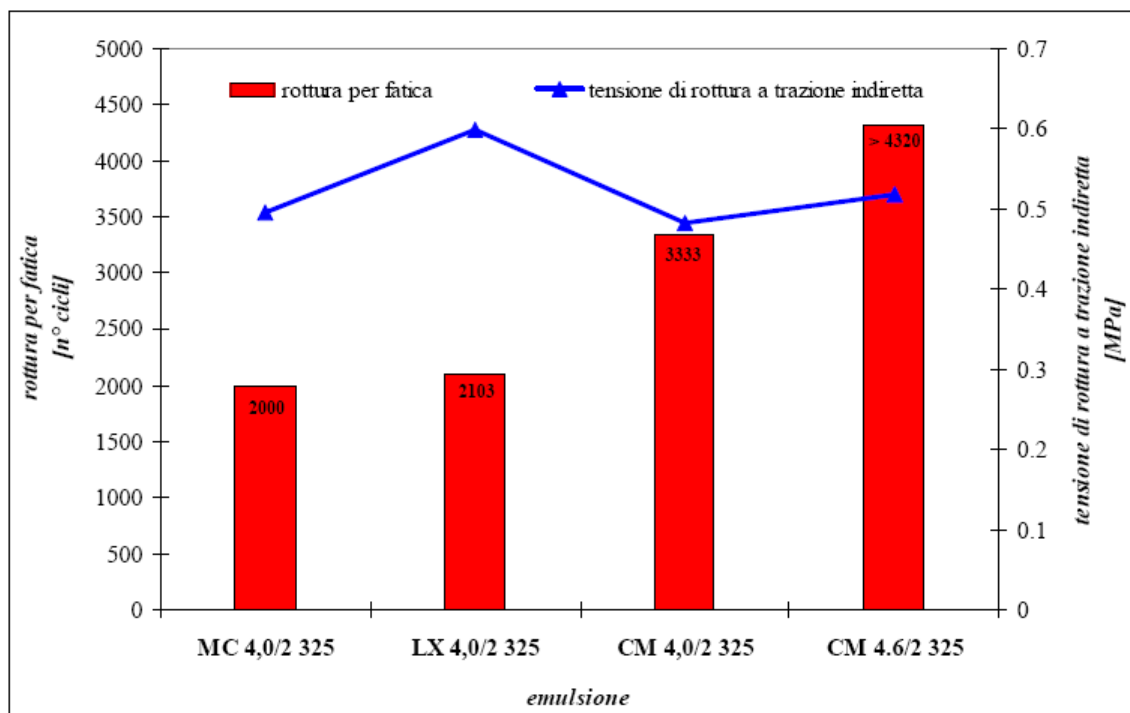


Figura 4. 13: Quadro di sintesi dei risultati a trazione indiretta e a fatica

Si può facilmente evincere dal grafico come un piccolo aumento del dosaggio dell'emulsione CM porti ad un notevole incremento della resistenza a fatica.

In conclusione l'emulsione bituminosa e le sue caratteristiche incidono sulle proprietà delle miscele da realizzare sia dal punto di vista volumetrico che meccanico. Essendo una miscela di bitume ed acqua, conferisce al prodotto alcune proprietà del bitume, tra le quali una maggiore elasticità dei legami. La viscosità dell'emulsione condiziona la lavorabilità e l'addensabilità della miscela, di conseguenza è un parametro che deve essere valutato con cura affinché si possa ottenere un prodotto facilmente costipabile e con un ridotto contenuto di vuoti. L'utilizzo di percentuali di emulsione più alte rendono il prodotto più difficile da lavorare e da compattare ma contemporaneamente ne migliorano le proprietà meccaniche. Nel breve termine i moduli di elasticità dipendono dalla penetrazione dell'emulsione, con valori maggiori si ottengono moduli più bassi. Una maggiore quantità di emulsione bituminosa incide positivamente sulla vita a fatica soprattutto se si usano emulsioni modificate (tipo SBS). Mentre le emulsioni con lattice rendono le miscele maggiormente resistenti a trazione indiretta ma meno a fatica.

4.4 IL CEMENTO PORTLAND

4.4.1 DEFINIZIONE

Con lo sviluppo della ricerca, nella tecnica del riciclaggio a freddo, si stanno affiancando al legante organico i leganti idraulici quali cemento e calce. La presenza contemporanea dei due tipi di leganti fornisce alla miscela i pregi dell'uno e dell'altro, migliorandone quindi le caratteristiche in opera.

Nel riciclaggio a freddo si può utilizzare cemento Portland, d'alto forno o pozzolanico, con classe di resistenza 325.

Il cemento Portland, il più importante dei leganti idraulici, è una miscela di clinker di gesso biidrato, o, più raramente, di anidrite naturale. Il clinker, a sua volta, è il prodotto della cottura, a circa 1300-1500°C, di una miscela di argilla, calcare, sabbia, ceneri di pirite ed altri materiali, opportunamente macinati, dosati e mescolati.

Il clinker di cemento Portland è sostanzialmente una miscela di composti basici (Sali) di calce con acido silicico (silicato tricalcico e silicato bicalcico) ed altri di calce con ossidi di alluminio, ferro, manganese e magnesio.

In realtà ciascuno dei costituenti mineralogici del clinker non si presenta come un composto puro, ma piuttosto sotto forma di una soluzione solida derivante dall'ingresso di elementi estranei nella struttura cristallina di base.

Nella chimica del cemento, per brevità, si usa scrivere C, A, F ed S rispettivamente al posto di CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 . In tal modo i composti mineralogici del clinker possono essere indicati con i simboli C_3S , $\beta\text{-C}_2\text{S}$, C_3A e C_4AF .

Mescolando separatamente ciascuno di questi sali con acqua, si ottengono delle paste che induriscono gradualmente. Dei quattro composti solo i silicati sono in grado di

produrre per reazione con l'acqua, impasti dotati di apprezzabile resistenza meccanica. Con il C₃S in particolare, a causa di una più alta velocità di idratazione, è possibile raggiungere resistenze meccaniche più elevate in un minor tempo.

Da ciò si potrebbe concludere che un cemento Portland ideale dovrebbe solo contenere solo C₃S, o una miscela di β-C₂S e C₃S. In realtà esistono almeno due ragioni, entrambe di carattere economico, che giustificano la presenza del C₃A e del C₄AF nel clinker di cemento Portland:

- difficoltà di reperire grandi quantitativi di calcare e sabbia privi di Al₂O₃ e Fe₂O₃;
- in presenza degli ossidi di ferro o di alluminio la formazione di una fase liquida, indispensabile ad una rapida produzione industriale dei silicati di calcio, avviene a temperature più basse e quindi in condizioni più economiche.

4.4.2 LA PRODUZIONE

Nelle sue linee essenziali la fabbricazione del cemento Portland consiste nel macinare e mescolare le materie prime, nel cuocere la miscela con fusione parziale (clinkerizzazione) fino ad ottenere fino al 20 al 30% di fase liquida, nel raffreddare piuttosto rapidamente il prodotto della cottura (clinker), e nel macinare il clinker in presenza di qualche per cento di gesso biidrato.

I processi di fabbricazione si differenziano sostanzialmente nel metodo di mescolamento delle materie prime, che può avvenire con un processo a secco o a umido.

I forni utilizzati nella cottura sono sostanzialmente di due tipi: rotante e verticale. Il primo più diffuso è costituito da un tubo leggermente inclinato con pendenza del 3-5%, lungo fino a 200 metri e con un diametro fino a 8 metri che ruota lentamente per far avanzare la miscela da cuocere. È costruito con mattoni refrattari resistente alle azioni corrosive del clinker oltre che alle temperature. Il bruciatore è situato nell'estremità inferiore del forno, ed è alimentato da aria mista a polvere di carbone, a nafta o a gas.

I forni verticali alti da 10 a 20 metri e con diametro di 2-3 metri, sono alimentati in alto dal granulato, miscela di coke e materie prime, che viene preriscaldato dalla corrente gassosa ascendente.

Qualunque sia il tipo di forno durante la cottura si verificano più reazioni che portano alla trasformazione delle materie prime nella miscela di C_3S , $\beta-C_2S$, C_3A e C_4AF .

A 500-600°C l'argilla, che è composta principalmente da silicati idrati di Al, Mg e Fe, comincia a perdere acqua di costituzione e a decomporsi in silice ed allumina amorfe o in metacaolino, anch'esso scarsamente cristallino.

A partire da 600-700°C iniziano le reazioni tra i prodotti di decomposizione dell'argilla e la calce che forniscono i quattro composti principali del clinker di cemento, riportati anche nella Tabella 4. 10:

Silicato tricalcico	3CaO SiO ₂	C ₃ S
Silicato bicalcico	2CaO SiO ₂	C ₂ S
Alluminato tricalcico	3CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A
Alluminato ferrito tetracalcico	3CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Tabella 4. 10: Composti Principali del Clinker

Il silicato tricalcico è il composto del cemento presente in quantità maggiore (60-70%), per ottenerlo è necessario raggiungere nel forno temperature maggiori di 1250°C.

Il clinker proveniente dal forno passa in un raffreddatore, che può essere a griglia, a satelliti, o cilindrico, dove viene raffreddato da una corrente di aria fredda. Il raffreddamento deve avvenire piuttosto rapidamente per impedire che i due silicati di calcio si trasformino in altre fasi non idrauliche, che non sono in grado cioè, di indurire per reazione con l'acqua.

Dal diagramma di stato del sistema CaO – SiO₂ si deduce che al di sotto di 1250°C il C₃S non è stabile e si decompone secondo la reazione:



che porta alla scomparsa di una fase altamente idraulica e alla produzione di una fase non desiderata. Se il clinker è portato rapidamente alle basse temperature, la velocità di questa reazione è trascurabile ed il C₃S si trova quasi integralmente come fase metastabile.

A raffreddamento avvenuto esso viene macinato in appositi mulini a sfera. Molto spesso la macinazione avviene in presenza di additivi aggiunti allo scopo di ottenere una polvere più fine.

4.4.3 PRESA E INDURIMENTO

Subito dopo il mescolamento del cemento con acqua, la pasta si presenta come una massa plastica facilmente deformabile. Di solito dopo qualche ora diviene più consistente e comincia a perdere la sua deformabilità e questo aumento di consistenza prende il nome di presa. Successivamente, di solito dopo un giorno, la pasta diviene così rigida da assumere l'aspetto e la durezza di una pietra, questo irrigidimento prende il nome di indurimento. Entrambi i processi sono il risultato di un complesso di reazioni chimiche tra i costituenti del cemento e l'acqua d'impasto.

In modo molto schematico si può pensare di suddividere formalmente l'idratazione del cemento in tre stadi: il primo (A) ha iniziato subito dopo l'impasto ed ha una durata di qualche decina di minuti, il secondo (B) dura qualche ora e corrisponde alla presa, il terzo (C) inizia poco prima di un giorno e riguarda l'indurimento (Figura 4. 14).

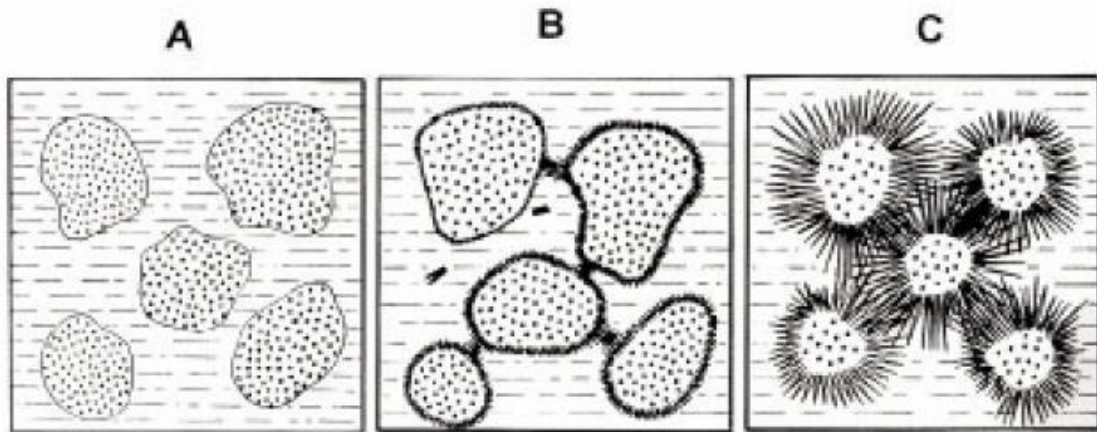


Figura 4. 14: Idratazione schematica del cemento

Subito dopo l'impasto, durante il primo stadio, la pasta di cemento è costituita da un insieme di granuli di clinker e di gesso, più o meno tondeggianti e di diametro variabile tra qualche micron e qualche decina di micron, dispersi nell'acqua. La mobilità delle particelle

solide, quindi la lavorabilità della pasta, è tanto maggiore quanto più alto è il contenuto di acqua.

A causa dei diversi pesi specifici dei prodotti anidri e di quelli idratati ottenuti dalla reazione di idratazione, per ogni unità di volume di cemento anidro che scompare, si formano mediamente 2,1 unità di volume di prodotto idratato. Ciò significa che, man mano che l'idratazione procede, una parte dello spazio originariamente occupato dall'acqua, viene ad essere riempito dai prodotti della reazione tra l'acqua ed il cemento. Questo determina durante la presa una minore mobilità delle particelle solide e quindi una maggiore consistenza della pasta. L'effetto è tuttavia quasi irrilevante per il basso grado di idratazione del cemento durante le prime ore. Inoltre i prodotti idratati sono estremamente più fini delle particelle di cemento, e si presentano per lo più sotto forma di lamine e di fibre. Sia il maggior sviluppo di area superficiale, che la particolare morfologia dei prodotti idratati contribuiscono ad una diminuzione della mobilità delle particelle solide e quindi ad un aumento della consistenza della pasta cementizia.

La formazione di alluminati idrati esagonali sotto forma di prodotti laminari, o l'accrescimento di cristalli di ettringite, entrambi capaci di formare dei ponti tra le particelle idratate, possono contribuire in modo determinante alla ulteriore perdita di plasticità dell'impasto e quindi alla presa del cemento. Tutti questi fenomeni principalmente dovuti all'idratazione degli alluminati e della fase ferrica, determinano il fenomeno della presa già dopo qualche ora dall'impasto del cemento con l'acqua.

Successivamente, soprattutto per l'idratazione dei silicati, si forma un prodotto che va a riempire ulteriormente il volume iniziale occupato dall'acqua. La natura prevalentemente fibrosa del prodotto idratato determina una struttura di fibre intrecciate che, insieme alla forza di adesione ed a quelle di Van der Waals, è responsabile dei legami che si stabiliscono tra le particelle solide e quindi dell'indurimento della pasta cementizia.

La resistenza meccanica della pasta indurita, oltre che dal grado di idratazione del cemento, dipenderà dalla distanza originaria dei granuli di cemento e cioè dal rapporto acqua/cemento dell'impasto.

Da un punto di vista chimico, le reazioni tra l'acqua ed i costituenti del cemento iniziano subito dopo il mescolamento. Già dopo alcuni minuti, l'acqua contiene una notevole quantità di ioni Ca^{2+} e OH^- che provengono in massima parte dalla reazione di idratazione del C_3S , in minor misura dall'idratazione del C_2S e da quella della calce libera contenuta nel clinker. La fase acquosa diviene rapidamente soprassatura ed il grado di soprassaturazione dipenderà principalmente dalla finezza del cemento, dal contenuto di C_3S e dal rapporto acqua/cemento. L'alluminato e la fase ferrica possono modificare il grado di soprassaturazione in $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a causa dell'assorbimento degli ioni Ca^{2+} e OH^- da parte degli alluminati e ferro-alluminati idrati.

Sulla base di quanto si è detto i principali composti solidi che si formano in quantità maggiore durante l'idratazione del cemento Portland sono l'idrossido di calcio, l'ettringite e il silicato di calcio idrato.

L'idrossido di calcio solido che si forma prima che la soprassaturazione raggiunga il massimo, proviene probabilmente dall'idratazione della calce libera del clinker o da quella topochimica del C_3S . Durante la cristallizzazione forma lamine sottili a contorno esagonale.

La soluzione rimane per un tempo relativamente lungo soprassatura in idrossido di calcio: la durata di questo periodo, che può variare da qualche ora a qualche decina di giorni, dipende sostanzialmente dal rapporto acqua cemento e dall'eventuale agitazione del sistema.

L'ettringite, che si forma nella pasta di cemento a seguito della reazione del C_3A con il gesso aggiunto come regolatore della presa, si presenta in cristalli molto piccoli ma instabili (Figura 4. 15).

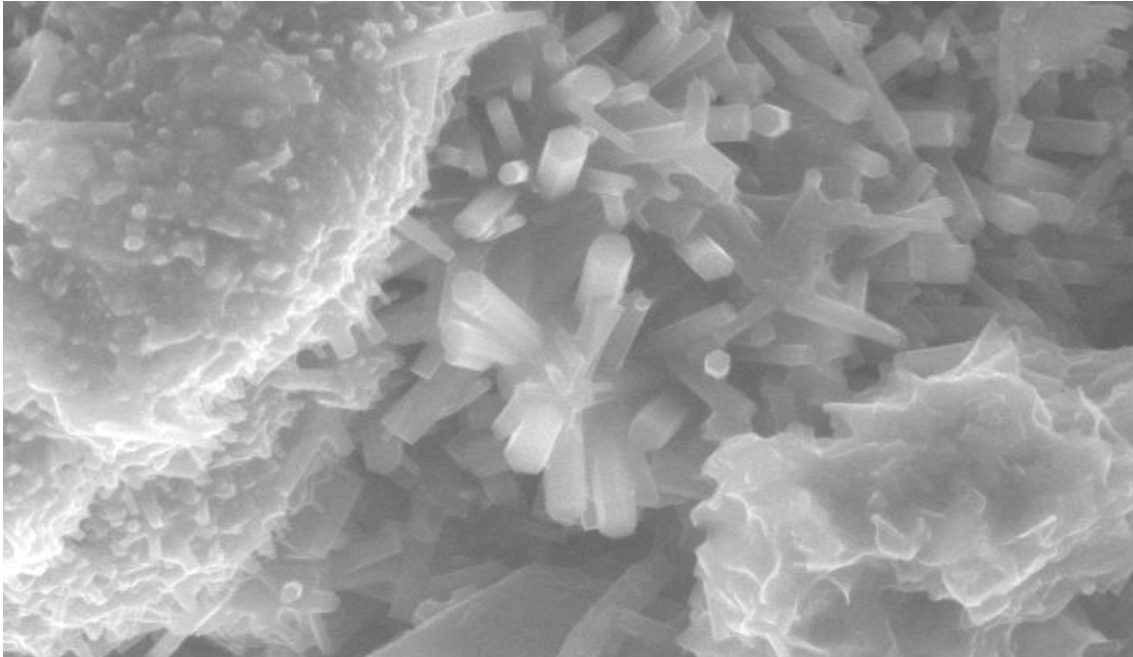


Figura 4. 15: Cristalli di Ettringite al Microscopio Elettronico

La morfologia dei cristalli di ettringite è influenzata dalla concentrazione degli ioni Ca^{2+} ed SO_4^{2-} della soluzione dalla quale i cristalli stessi si formano. In soluzioni molto concentrate in $\text{Ca}(\text{OH})_2$, si presentano sotto forma di piccoli cristalli prismatici mentre in soluzioni povere in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ essa si presenta sotto forma di cristalli allungati e ben sviluppati. Nel primo caso, questa forma di ettringite è detta colloidale e in grado di assorbire notevole quantità di acqua grazie all'enorme sviluppo superficiale oltre che per la sua particolare struttura cristallina. Per quanto riguarda il fenomeno della presa è probabile che la formazione di ettringite colloidale possa determinare un sostanziale aumento di consistenza della pasta cementizia. Quando la concentrazione degli ioni SO_4^{2-} nella fase acquosa scende al di sotto di un certo limite, l'ettringite non è più stabile e tende progressivamente a trasformarsi, già a partire da un giorno dall'impasto, nel monosolfatoalluminato idrato. Eccezionalmente questo composto può formarsi anche nelle prime ore perché si possono verificare localmente concentrazioni molto basse in SO_4^{2-} .

Lo sviluppo del silicato di calcio idrato indicato con la sigla C - S - H (che non è una formula ma piuttosto un acronimo inglese di Calcium Silicate Hydrated) ha inizio, praticamente, con la prima formazione del $\text{Ca}(\text{OH})_2$; tuttavia la sua identificazione per la natura scarsamente cristallina è estremamente difficile. Il C - S - H , può presentarsi in forme particellari diverse, è di natura prevalentemente fibrosa e ad esso si deve l'indurimento e le proprietà meccaniche delle paste cementizie (Figura 4. 16). Col progredire della reazione le fibre prima si toccano poi si intrecciano tra loro.

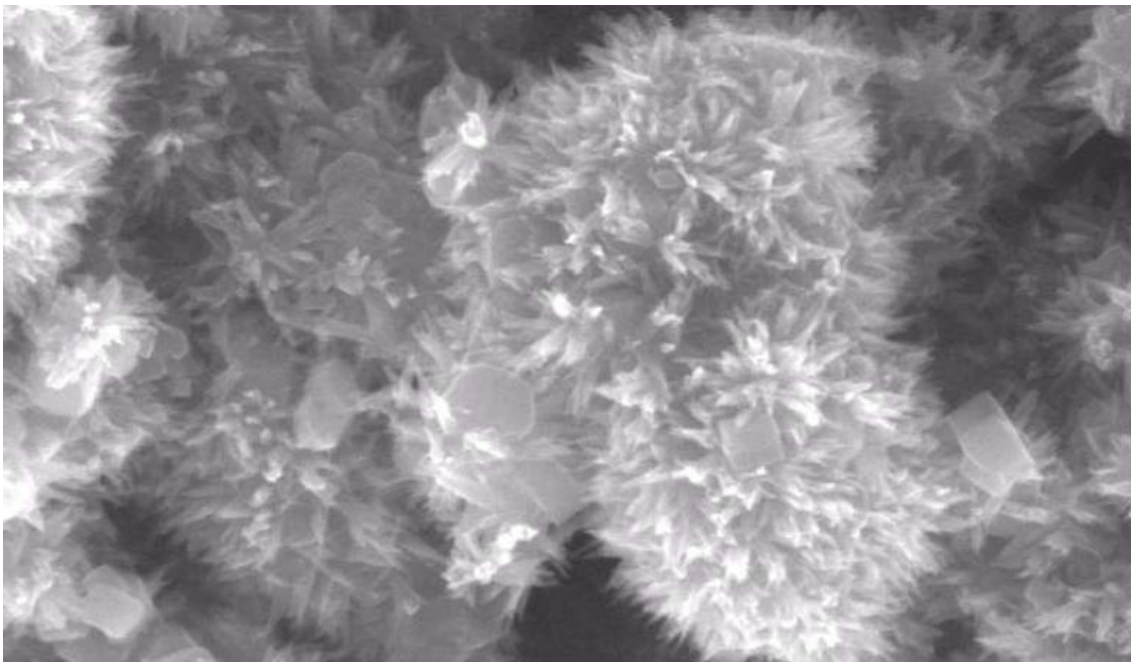


Figura 4. 16: Il C-S-H Visto al Microscopio Elettronico

L'idratazione del cemento Portland può essere quindi schematizzata dalle seguenti reazioni:

- PRESA: C_3A e C_4AF + Gesso + H_2O → Ettringite e Ca-alluminati Idrati (Figura 4. 17);
- INDURIMENTO: C_3S e C_2S + H_2O → C - S - H e Idrossido di calcio (Figura 4. 18).

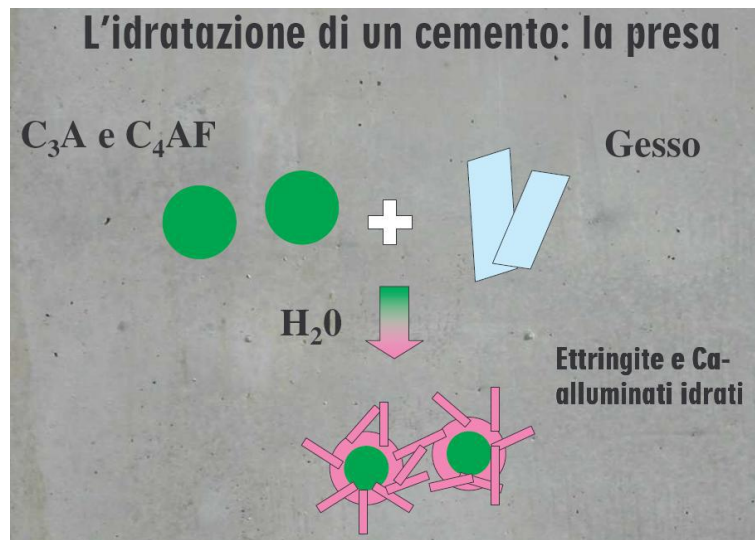


Figura 4. 17: Schematizzazione delle Reazioni Durante la presa del cemento

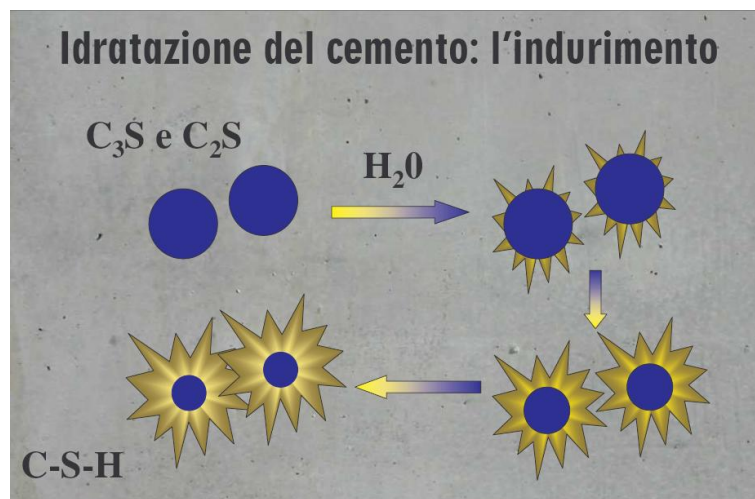


Figura 4. 18: Schematizzazione delle reazioni durante l'indurimento del cemento

Al termine dell'idratazione del cemento Portland, il C-S-H, l'ettringite e l'idrossido di calcio possono essere facilmente individuati analizzando al microscopio elettronico un prodotto di tale processo (Figura 4. 19).

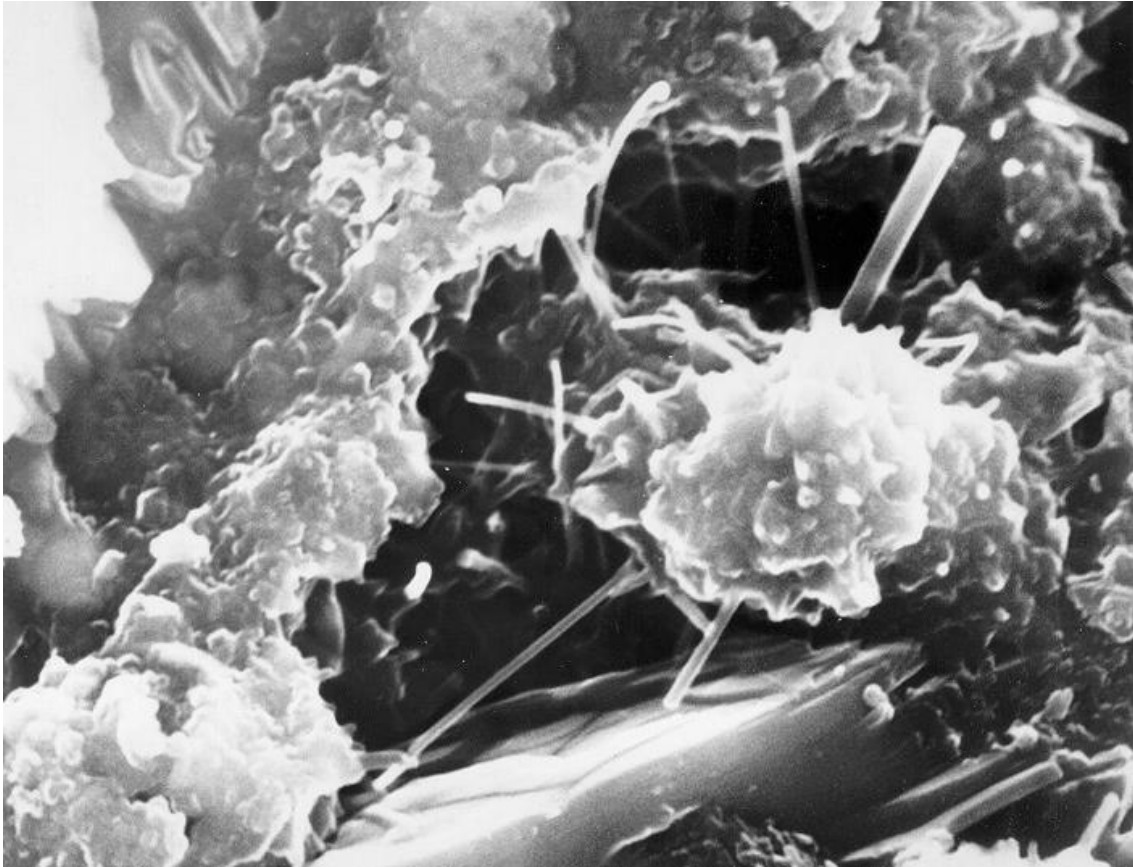


Figura 4. 19: C-S-H, Ettringite e Idrossido di Calcio al Microscopio Elettronico

4.4.4 INFLUENZA DELLA TEMPERATURA SULL'IDRATAZIONE DEL CEMENTO

La temperatura ha una notevole importanza sull'idratazione del cemento, quasi tutti i cementi sono progettati per esplicare le loro caratteristiche ottimali a temperature ambiente, in un intervallo compreso all'incirca tra 10°C e 30°C. Quando la temperatura si trova al di fuori di questo intervallo, sia la presa che l'indurimento risultano sensibilmente modificati.

In generale, un aumento della temperatura provoca una presa più rapida dovuta essenzialmente alla maggior velocità di idratazione del C₃A che sottrae acqua all'impasto fresco, anche se ciò comporta una maggiore difficoltà del trasporto e nella messa in opera degli impasti cementizi.

Al contrario, un abbassamento della temperatura rallenta la presa del cemento e, da un punto di vista pratico, ciò non ha conseguenze negative sull'esecuzione delle opere in calcestruzzo se si eccettua l'abbassamento della resistenza meccanica alle brevi stagionature.

Nella Figura 4. 20 è mostrato schematicamente l'effetto della temperatura sul tempo iniziale e finale di presa. Si può osservare che un aumento della temperatura provoca una sensibile riduzione del tempo di presa, ed in particolare di quello finale di presa. La maturazione del calcestruzzo è fortemente influenzata dalla temperatura, che, se superiore a 30°C genera eccessiva evaporazione e una rapida idratazione del conglomerato cementizio. Questo produce un aumento della resistenza meccanica a brevi stagionature, ma una diminuzione della resistenza meccanica a lunghe stagionature.

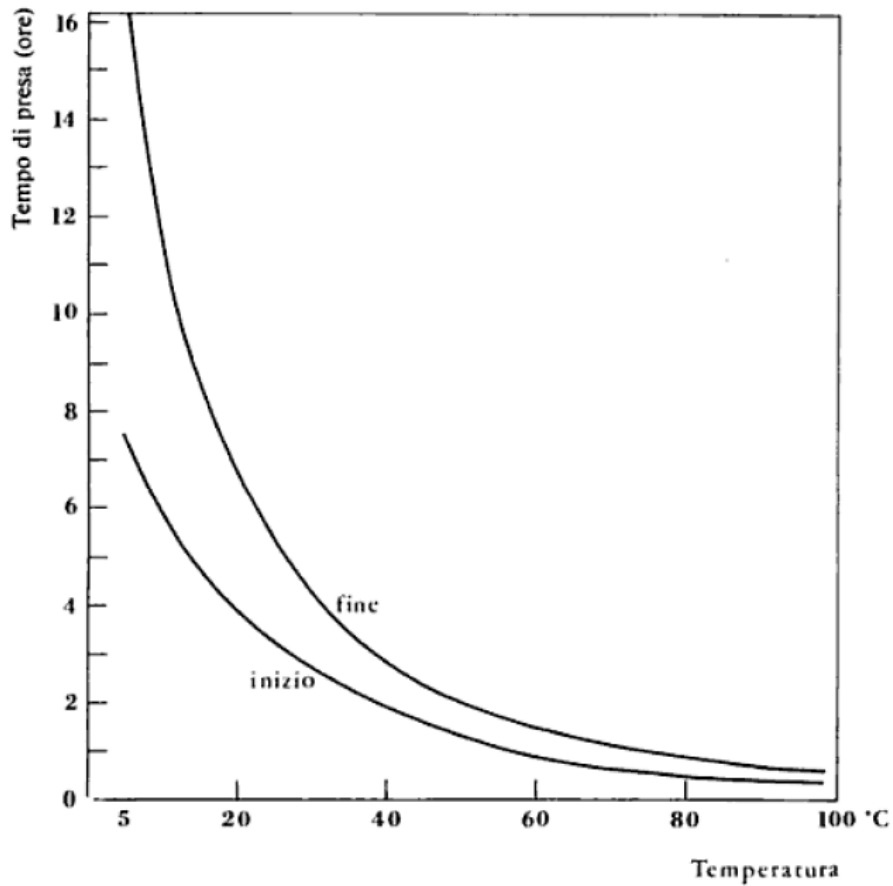


Figura 4. 20: Influenza della Temperatura sui Tempi Iniziali e Finali di Presa per un Cemento Portland

Le basse temperature provocano una maturazione più lenta e basse resistenze meccaniche per brevi stagionature, ma permettono al calcestruzzo di raggiungere più alte resistenze a compressione per lunghe stagionature.

Si ritiene che l'aumento di resistenza a compressione ottenuto a basse temperature sia dovuto alla migliore qualità dei silicati idrati di calcio, responsabili della resistenza meccanica del conglomerato, prodotti attraverso un processo di idratazione più lento.

Le alte temperature quindi si ripercuotono in una più rapida perdita di lavorabilità del conglomerato cementizio alla quale si è soliti ovviare facendo ricorso ad accorgimenti quali: aumentare l'acqua d'impasto; fare uso di additivi che ritardino la presa; "curing" per proteggere il calcestruzzo giovane, impedendo una eccessiva evaporazione dell'acqua dal

calcestruzzo; scegliendo un cemento la cui presa sia meno influenzata dalla temperatura, o, infine, preraffreddando gli elementi che compongono l'impasto cementizio.

Tutte le reazioni tra l'acqua e i costituenti del cemento sono esotermiche, ed il calore che si sviluppa è detto calore di idratazione. Esso è di grande ausilio quando si opera in climi freddi, ma può divenire un grosso inconveniente in climi caldi poiché produce fessurazioni da ritiro che vanno opportunamente evitati.

4.5 AGGREGATI

4.5.1 DEFINIZIONE

In tutte le miscele che si impiegano nella tecnica stradale, l'aggregato lapideo rappresenta la parte più importante, almeno in termini volumetrici. Una classifica può essere fatta distinguendo i minerali in naturali ed artificiali.

I minerali naturali, provenienti da frantumazione di rocce in massa o da frantumazione di materiali granulari alluvionali e no, a seconda della loro origine, vengono impiegati nei diversi strati della sovrastruttura stradale. I calcari, per esempio, sono scarsamente utilizzati negli strati superficiali a causa della loro elevata usurabilità. I materiali granulari alluvionali sono anche preferiti negli strati profondi, evidentemente per la scarsa possibilità di ricavarne elementi a spigoli vivi. Negli strati di usura hanno il loro dominio di elezione le rocce eruttive e metamorfiche.

In generale le rocce più utilizzate e resistenti hanno una struttura fina e una porosità quasi nulla, in compenso la microrugosità è durevole e comunque si può contare su una buona permanenza degli spigoli vivi.

I materiali artificiali sono caratterizzati da una buona durevolezza, resistenza all'abrasione e al mantenimento degli spigoli vivi e da una rugosità non eccessiva. Sono spesso impiegati nei trattamenti di superficie.

Gli aggregati lapidei costituiscono lo scheletro di tutti gli strati che compongono una sovrastruttura stradale. Volendone dare una classificazione granulare si distinguono il pietrisco, pietrischetto e graniglia che rappresentano l'insieme degli aggregati grossi (granulometria maggiore di 4 mm). Poi ci sono le sabbie (sabbia grossa, media e fine), che compongono la famiglia degli aggregati fini ed hanno, per definizione, pezzatura compresa

tra 2 e 0.075 mm. Il materiale polverulento passante al setaccio UNI 0.075 mm è chiamato filler o additivo minerale.

4.5.2 CARATTERISTICHE DEGLI AGGREGATI

Per la produzione di conglomerati bituminosi di qualità da impiegare negli strati più sollecitati della sovrastruttura si utilizzano aggregati provenienti da rocce con particolari caratteristiche di resistenza, frantumati artificialmente e vagliati con l'obiettivo di ottenere spigoli vivi e un prestabilito assortimento granulometrico. La norma C.N.R. del B.U. n°139/92 ne definisce i requisiti d'accettazione.

La principale caratterizzazione degli aggregati lapidei per uso stradale viene fatta in base ai seguenti parametri:

- Caratteristiche fisiche;
- Caratteristiche meccaniche;
- Caratteristiche chimiche.

Le *caratteristiche fisiche* che assumono maggiore rilievo sono: forma dei grani, massa volumetrica, composizione granulometrica.

Per quanto riguarda le caratteristiche di forma, le definizioni usuali implicano l'accettazione della forma poliedrica che, come è noto, risponde a criteri di regolarità e buona resistenza. Il controllo di tale caratteristica si effettua, secondo le norme italiane, attraverso la misura dell'indice dei vuoti di un campione delle singole classi granulometriche. È anche in uso la definizione di un coefficiente di forma dato dal rapporto tra il volume di un singolo elemento e il volume della sfera che ha per diametro la dimensione maggiore dell'elemento stesso.

Da un punto di vista granulometrico, l'aggregato è diviso in classi, e la miscela granulometrica risulterà composta da un'opportuna combinazione di queste. È importante che le classi siano opportunamente definite, tenuto conto delle tolleranze che le stesse norme prevedono, a garantire una costanza di composizione che non può essere assicurata

dalla riclassificazione operata negli impianti di confezione del conglomerati. È bene che l'impianto di produzione delle classi di inerti sia tenuto costantemente sotto controllo.

D'importanza minore e collegate a particolari condizioni di impiego sono le caratteristiche di imbibizione, porosità e gelività. Il coefficiente di imbibizione si definisce come il rapporto fra il peso di acqua assorbita da un provino di roccia immerso e quello del materiale secco. In effetti nella prova di imbibizione si tiene conto soltanto dei vuoti che sono in comunicazione con la superficie esterna del provino e sono quindi raggiungibili dall'acqua in cui è immerso il pezzo di roccia. Le norme C.N.R. in proposito stabiliscono che il provino di roccia sia essiccato in stufa a 110°C e che poi sia immerso in acqua distillata a 15-20°C fino a completa saturazione. La misura del coefficiente di imbibizione e di porosità sono tuttavia indispensabili ogni volta che l'aggregato non si presenti indiscutibilmente compatto.

La prova di gelività è di notevole importanza nei paesi freddi, dove l'aumento di volume dell'acqua di imbibizione all'atto del congelamento provoca nelle rocce veri e propri effetti di disgregazione. Le prove per definire se un materiale è gelivo variano da paese a paese. Le norme italiane prevedono che la gelività vada determinata su cubetti di roccia aventi 7,1 cm di lato per pietre a grana fine e 10cm di lato per quelle a grana grossa. Si eseguono operazioni freddo caldo freddo con intervalli di 5 minuti con almeno 25 alternanze. La resistenza a gelo della roccia è messa in evidenza dall'assenza o meno di evidenti alterazioni o sfaldature.

Le *caratteristiche meccaniche* vengono determinate analizzando le resistenze alla compressione e all'abrasione, la levigabilità superficiale e la resistenza ai cicli di gelo e disgelo. Per determinare la resistenza alla frantumazione per effetto di carichi statici e dinamici o la resistenza all'abrasione sono state proposte diverse prove. Le misure di resistenza eseguite con prove classiche, quali compressione semplice e la trazione

brasiliana, hanno il difetto di operare su carote o provini convenientemente preparate e che, se possono fornire dati attendibili per giacimenti di roccia sana, non riescono a dare indicazioni sulla qualità del prodotto nel caso di rocce eterogenee. Una prova utilizzata in Inghilterra e citata da Protodiakonov consiste nello schiacciare tra i due piatti di una pressai singoli grani di un certo campione di aggregati. Essa fornisce ottime indicazioni sull'eterogeneità del materiale, ma è estremamente lunga.

Per determinare la resistenza all'abrasione si usa la prova Los Angeles, essa si presenta abbastanza bene per la sua buona ripetibilità, alla caratterizzazione dei materiali lapidei. L'apparecchio è costituito da un cilindro in acciaio chiuso alle due estremità, che porta nell'interno un setto metallico disposto secondo una generatrice all'interno del quale si aggiungono delle sfere in numero variabile a seconda del tipo di aggregati. Al cilindro si fanno compiere diversi giri. Al termine della prova si calcola la quantità di passante al setaccio avente apertura delle maglie 1,68 mm in base al peso del materiale trattenuto da detto setaccio dopo averlo lavato ed essiccato fino a peso costante. Il coefficiente Los Angeles è dato dalla perdita in peso riferita percentualmente al peso iniziale e viene espresso nella seguente forma:

$$LA = \frac{G_i - G_f}{G_i} * 100$$

Essendo G_i il peso del trattenuto al setaccio 12 ASTM prima della prova e G_f il peso del trattenuto al stesso setaccio dopo la prova.

La Los Angeles offre il vantaggio di operare sul materiale così come proviene dagli impianti di frantumazione, selezionandolo soltanto granulometricamente nei sette tipi previsti.

La tendenza alla perdita della rugosità microscopica è misurata con il coefficiente CPA, questa valutazione è influenzata dalla durezza media della roccia, ma soprattutto dalla differenza di durezza dei singoli minerali presenti.

4.6 IL RUOLO DELLA GRANULOMETRIA

4.6.1 DEFINIZIONE E INFLUENZA SULLE CARATTERISTICHE DELLA MISCELA

Il fresato ed il cemento sono correlati in merito al discorso sulla scelta della granulometria degli inerti che andrà utilizzata nella miscela.

Sia il materiale riciclato, derivante dalla fresa, che il nuovo, necessita dello studio e progetto della curva granulometrica degli inerti; il RAP essendo costituito per il 93-97% in peso da aggregati litici e per il resto da bitume invecchiato si deve considerare a tutti gli effetti come un materiale inerte.

Il materiale fresato in sito deve essere campionato (facendo riferimento a sezioni stradali significative, ubicate ad una distanza di circa 300÷400 m le une dalle altre) e di questi campioni occorre trovarne la curva granulometrica in laboratorio in modo da determinare le percentuali di passante ai vari setacci. Poiché il RAP da sottoporre alle analisi granulometriche deve essere rappresentativo del materiale costituente la vecchia pavimentazione è opportuno utilizzare la stessa fresatrice che si impiegherà per l'intervento previsto operando alle stesse condizioni (velocità di avanzamento e spessore interessato).

Al termine di questa preliminare e principale operazione, deve essere valutata la necessità di una eventuale correzione affinché la curva granulometrica rientri nei fusi prescritti dai vari capitolati; se la curva granulometrica "bianca" del RAP non rientra nel relativo fuso si può operare in due modi:

- addizionando inerti vergini
- declassando il materiale per usi che presentano fusi più ampi (ad esempio strati più bassi all'interno del pacchetto stradale oppure riutilizzare il materiale per piste ciclabili o pedonali, ecc.).

Si può ricorrere all'integrazione di inerti vergini anche quando la presenza di bitume nel RAP risulta eccessiva, generalmente non dovrebbe eccedere il 6% in peso del fresato (quantitativi eccessivi di bitume, anche se invecchiato, rischierebbero di alterarne il comportamento provocando delle deformazioni plastiche). Questo problema in realtà si presenta principalmente nella scarifica superficiale (CIR) e non in quella profonda (FDR) dove spesso si arrivano a fresare strati di misto granulare privo addirittura di legante.

La fresatura produce un notevole quantitativo di materiale fine (passante al setaccio 200 ASTM) anche superiore al 15% in peso del RAP, in parte costituito da inerti veri e propri ed in parte da bitume (questo valore è altamente variabile a seconda del tipo di fresa e dalle modalità di scarifica). Tale percentuale necessita di correzioni al fine di far rientrare la percentuale di filler entro valori accettabili (7÷10%).

Un ulteriore problema relativo alla granulometria ed al tipo di fresa impiegato è la possibile presenza di veri e propri pezzi di asfalto detti "croste". Per ottenere una miscela il più possibile omogenea si deve evitarne la presenza limitandone le dimensioni massime (che in genere non debbono eccedere i 30 mm per basi e fondazioni). Per questi due motivi (per opere di una certa importanza) l'impiego di una vagliatrice-frantumatrice a seguito della fresa è ritenuto indispensabile.

Analizzando ulteriormente la frazione fine, si evince che anche il cemento rientra nel filler andando ad incrementare la percentuale di fine della miscela (il Portland viene impiegato nell'ordine dell'1.5÷2% sul peso degli inerti, quindi in dosaggi modesti e leggermente inferiori a quelli tipici dei misti cementati). Il filler minerale a differenza di quello in cemento rimane chimicamente inerte mentre il secondo reagisce chimico-fisicamente modificando sensibilmente le caratteristiche volumetriche e meccaniche dell'impasto. Non è comunque opportuno computarlo al momento della determinazione

della curva granulometrica in quanto, il cemento funge da sostanza chimica reagendo con acqua promuovendo e accelerando determinati processi.

Occorre osservare che un eccesso di fine può portare ad un conglomerato chiuso (con i problemi che ne conseguono). In realtà questo problema non sussiste in quanto il legante principe per questi impasti è l'emulsione bituminosa che, essendo ricca di acqua (35÷40% in peso dell'emulsione) non consente ai componenti solidi di compattarsi più di tanto. Le miscele legate con emulsione presentano un tasso di vuoti elevato solitamente superiore al 12÷12.5% in volume della miscela nonostante si operi un perfetto costipamento. La Tabella 4. 11 e la Figura 4. 21 mostrano i campi granulometrici identificati dall'Asphalt Academy (TG 2, 2009) come ideali per il confezionamento di miscele con emulsione bituminosa e bitume schiumato.

Sieve size (mm)	Parent Material Tests and Indicators for Classification of BSMs			
	BSM-Emulsion		BSM-Foam	
	Ideal	Less suitable	Ideal	Less suitable
50	100		100	
37.5	87 – 100		87 – 100	
26.5	77 – 100	100	77 – 100	100
19.0	66 – 99	99 – 100	66 – 99	99 – 100
13.2	67 – 87	87 – 100	67 – 87	87 – 100
9.6	49 – 74	74 – 100	49 – 74	74 – 100
6.7	40 – 62	62 – 100	40 – 62	62 – 100
4.75	35 – 56	56 – 95	35 – 56	56 – 95
2.36	25 – 42	42 – 78	25 – 42	42 – 78
1.18	18 – 33	33 – 65	18 – 33	33 – 65
0.6	12 – 27	27 – 54	14 – 28	28 – 54
0.425	10 – 24	24 – 50	12 – 26	26 – 50
0.3	8 – 21	21 – 43	10 – 24	24 – 43
0.15	3 – 16	16 – 30	7 – 17	17 – 30
0.075	2 – 9	9 – 20	4 – 10	10 – 20
Grading Requirements of BSMs				

Tabella 4. 11: Campi Granulometrici Ideali ed Accettabili per Leganti a Base di Bitume

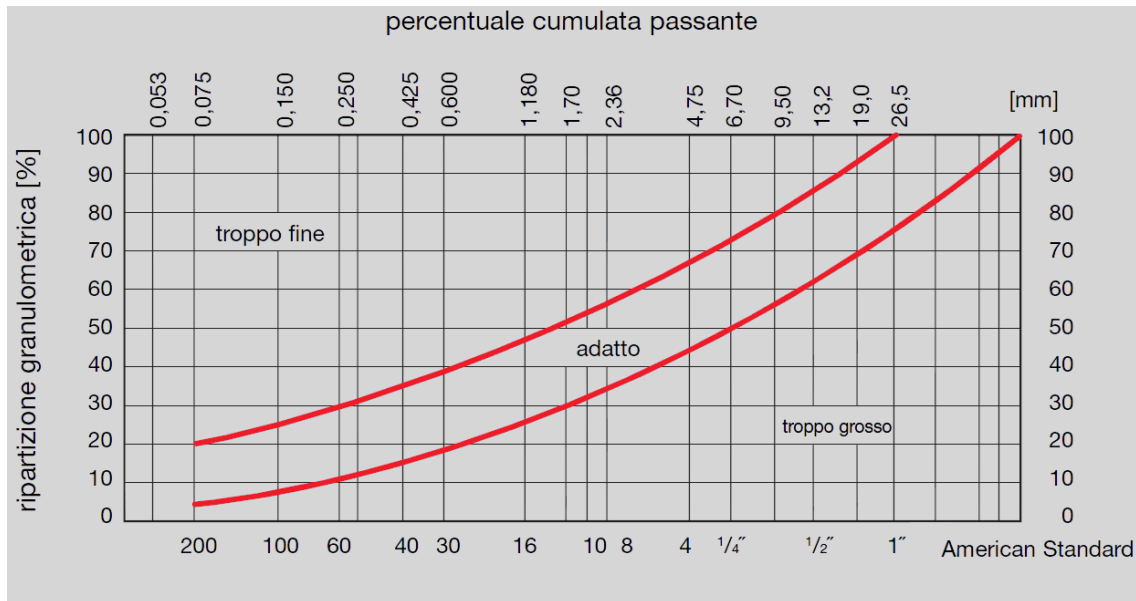


Figura 4. 21: Campi Granulometrici Ideali ed Accettabili per Leganti a Base di Bitume

Per poter ottenere la massima densità si deve verificare mediante prove di costipamento in laboratorio (ad esempio prova Proctor) la quantità ottima di acqua che generalmente per i conglomerati riciclati a freddo si aggira intorno al 5÷7% rispetto al peso del RAP. Al momento di confezionare il conglomerato si deve considerare la quantità di acqua contenuta nell'emulsione affinché in laboratorio si possa conseguire la medesima (o comunque simile) densità ottenuta sui campioni testati. E' necessario anche valutare l'umidità del fresato, estremamente variabile a seconda delle condizioni atmosferiche al momento della fresatura o immediatamente successive.

Il quantitativo totale di acqua è dato dalla somma dell'umidità degli inerti-RAP, dell'acqua presente nell'emulsione e di quella di pre-bagnatura (eventualmente spruzzata sotto forma di slurry assieme al cemento nella camera di miscelazione).

Un elevato contenuto di fine incrementa in maniera sensibile la superficie specifica offerta dagli inerti e conseguentemente modifica la velocità di rottura dell'emulsione che aumenta con l'aumentare della frazione fine; inoltre la presenza di questa realizza con

l'emulsione una pasta viscosa mentre gli aggregati più grossi tendono a non essere completamente rivestiti dal legante organico.

Anche il cemento, essendo una sostanza finissima, contribuisce a questo processo di amalgama con l'emulsione, analogamente a quanto avviene con il filler minerale.

Quello che si rivela un difetto in fase di lavorazione, in fase di messa in opera risulta essere invece un pregio, soprattutto nei Paesi caldi, dove la presenza del filler contribuisce ad evitare il rifluimento del bitume. Ad onor del vero tale problema è più sentito negli strati alti del pacchetto stradale e non tanto in quelli profondi come la fondazione dove gli effetti termici si sentono poco.

4.7 IL FILLER (ATTIVO O NATURALE)

4.7.1 DEFINIZIONE

Si definisce “filler” la parte più fine degli aggregati (passante al setaccio 0.075 mm della serie ASTM) che si produce dalla frantumazione degli aggregati stessi o che si recupera dal sistema di depolverizzazione presente negli impianti di produzione di conglomerato bituminoso a caldo. In questo caso è normalmente definito “filler di recupero”.

Il “filler d’apporto”, invece, è quello che si acquista per integrare la curva granulometrica ed è solitamente rappresentato da carbonato di calcio, calce, cemento (non del tipo a presa rapida) o ceneri volanti, che costituiscono fillers che alterano chimicamente le proprietà del mix e a cui perciò si riferisce il termine “attivo”, contrariamente a quanto accade ad esempio per un filler “naturale” come la farina di roccia, il cui scopo è ridotto all’integrazione della frazione fine della miscela per facilitare la dispersione del bitume.

4.7.2 CARATTERISTICHE DEL FILLER

Durante la fase di studio della miscela, è opportuno valutare tutte le caratteristiche di un filler per poter operare una scelta in sicurezza. Si devono determinare:

- Coefficiente di attività: definito come la misura del rapporto tra la quantità di filler calcareo di riferimento e la quantità del filler in esame, necessaria a produrre un determinato abbassamento dell'equivalente di sabbia di una miscela;
- Costipabilità: si misura la densità raggiungibile con una prova di costipamento standard;
- Coefficiente di idrofilia: si misura il volume di sedimentazione di un peso noto del filler in esame una volta in acqua e una volta in cherosene. Il rapporto tra i due volumi indica la sensibilità del filler rispetto all'acqua;
- Superficie specifica: può essere misura direttamente attraverso l'uso del permeametro;
- Esame della struttura del filler al microscopio.

4.7.3 INFLUENZA DEL FILLER SULLE PROPRIETÀ REOLOGICHE DEI BITUMI

L'aggiunta del filler nel bitume influisce sulle caratteristiche reologiche; le esperienze eseguite hanno messo in evidenza che l'adsorbimento del bitume da parte del filler varia molto con la penetrazione del bitume e con la natura dell'additivo. Il punto di rammollimento aumenta con il crescere del tenore del filler mentre la penetrazione decresce con l'aumentare di esso. L'adesione a pietre asciutte aumenta con la percentuale di additivo, tale aumento comincia a notarsi al di sopra di un certo valore di detta percentuale. Tali modificazioni del comportamento possono essere evidenziate solo sul bitume e sulle miscele bitume-filler mediante le prove di penetrazione alle varie temperature. Le ragioni per cui incorporare filler attivo in un BSM (Bitumen Stabilised Material) sono:

- Migliorare l'adesione del bitume all'aggregato
- Migliorare la dispersione del bitume nel mix
- Modificare la plasticità dei materiali naturali, riducendola (riduzione PI)
- Aumentare la rigidità del mix e la velocità di sviluppo della resistenza
- Accelerare la maturazione del mix compattato

4.8 GLI ADDITIVI

Gli additivi sono prodotti naturali o di sintesi chimica che, aggiunti agli aggregati o al bitume, consentono di migliorare le prestazioni dei conglomerati bituminosi stessi.

Tra gli additivi chimici rientrano anche i cosiddetti “rigeneranti”, che svolgono un ruolo importante in materia di riciclaggio del conglomerato bituminoso.

I possibili agenti rigeneranti sono derivati del petrolio. Essi hanno il compito di bilanciare il rapporto asfaltini/malteni del bitume invecchiato recuperando di conseguenza una certa duttilità e di ridurre la fragilità alle basse temperature. Comunque, contrariamente al riciclaggio a caldo in stabilimento, quello a freddo in sito non consente un intimo mescolamento tra il bitume invecchiato e quello ringiovanito, tendendo quest'ultimo in tal caso ad agire piuttosto come lubrificante. Un quantitativo eccessivo può compromettere la stabilità della miscela portando ad una superficie liscia.

Gli Attivanti Chimici Funzionali (ACF), impiegati per le caratteristiche del bitume invecchiato contenuto nel conglomerato bituminoso da riciclare, sono additivi particolari che presentano le caratteristiche chimico-fisiche illustrate nella Tabella 4. 12 seguente.

Parametro	Normativa	Unità di misura	Valore
Densità a 25/25°C	ASTM D - 1298		0.900 - 0.950
Punto di infiammabilità v.a.	ASTM D - 92	°C	200
Viscosità dinamica a 160°C, $\gamma = 10s^{-1}$	SNV 671908/74	mPa s	30 -50
Solubilità in tricloetilene	ASTM D - 2042	% in peso	99.5
Numero di neutralizzazione	IP 213	mg/KOH/g	1.5 - 2.5
Contenuto d'acqua	ASTM D - 95	% in volume	1
Contenuto di azoto	ASTM D - 3228	% in peso	0.8 - 1.0

Tabella 4. 12: Caratteristiche chimico-fisiche degli ACF

4.9 L'ACQUA

L'acqua che si trova in natura può non essere adatta all'impiego a causa delle impurità in essa presenti, sia in soluzione sia in sospensione; di particolare importanza è la presenza di ioni positivi e negativi che possono influenzare le proprietà delle emulsioni. L'acqua aggiunta agli aggregati durante la miscelazione ammorbidisce i materiali argillosi o le frazioni di terreno pesante, in modo tale da rompere le agglomerazioni e permettere una distribuzione più uniforme all'interno della miscela.

L'acqua separando le particelle fini e sospendendole in un mezzo liquido, crea dei canali attraverso i quali penetrerà il bitume, che poi andrà a rivestire le particelle minerali, portando benefici in termini di lavorabilità e compattazione.

Per creare una miscela soddisfacente è necessario introdurre una giusta quantità d'acqua, in quanto, un'eccessiva umidità sarebbe indesiderabile a causa della conseguente riduzione del ricoprimento degli aggregati.

L'acqua costituisce un fattore chiave in quanto elemento regolatore della lavorabilità, dei meccanismi di rottura dell'emulsione, del meccanismo di presa ed indurimento della frazione cementizia e nei tempi di riapertura al traffico.

La miscela da comporre e compattare in opera presenta un contenuto significativo di acqua derivante dalla frazione acquosa dell'emulsione bituminosa, dall'acqua di raffreddamento delle frese nel processo di demolizione, dall'acqua eventualmente compresa nella boiaccia cementizia che costituisce elemento terzo nella formulazione finale degli impasti. L'intrinseca impermeabilità all'acqua ed all'aria degli strati bituminosi condiziona i tragitti ed i tempi di evacuazione dell'acqua dagli strati riciclati e i tempi di sviluppo di determinate resistenze meccaniche, ovvero i tempi di apertura parziale o definitiva al traffico.

4.10 POLVERINO DI GOMMA CRIOGENIZZATO

4.10.1 LA GRANULAZIONE CRIOGENICA

Il polverino di gomma utilizzato in questa sperimentazione è stato ottenuto tramite l'oramai noto processo di granulazione criogenica, che viene qui brevemente descritto. Esso è un processo di macinazione meccanica che avviene per fasi successive, effettuata per mezzo di lame e coltelli rotanti. Possono essere trattati indifferentemente pneumatici di autocarri, di auto e scarti di articoli in gomma ed il processo è normalmente finalizzato alla produzione di granulato e polverino con un trattamento differenziato, a seconda che si ottengano detti prodotti da pneumatici di auto o di autocarro. Per quest'ultimi si rende necessaria un'operazione preliminare di rimozione del tallone, con la quale vengono separati, senza rottura, i due anelli dallo pneumatico per limitare significativamente l'usura delle macchine di frammentazione. Nella figura seguente si riporta uno schema generale del funzionamento di un impianto di granulazione criogenica.

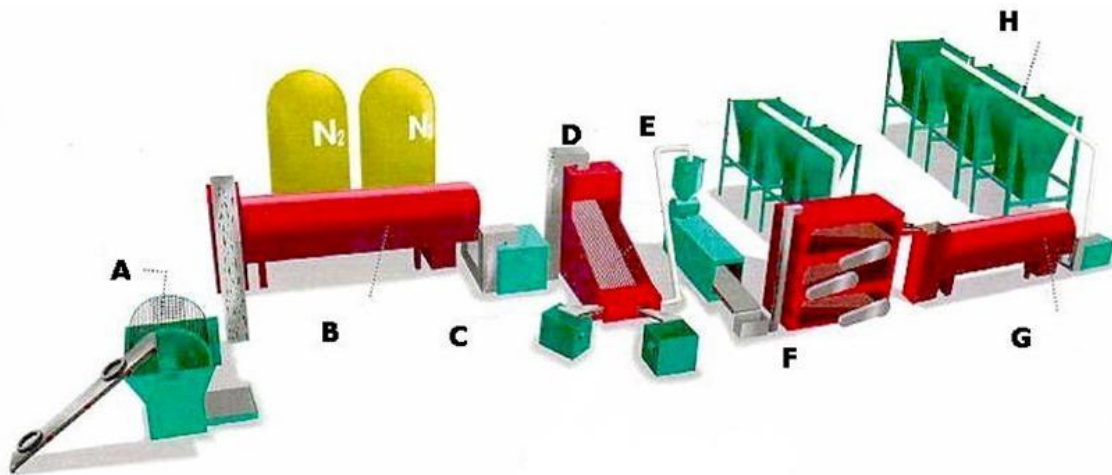


Tabella 4. 13: Funzionamento di un Impianto di Granulazione Criogenica

Il processo inizia quindi con una triturazione grossolana preliminare (A) che è simile a quella dell'impianto di granulazione a temperatura ambiente. I frammenti di

gomma, della dimensione di circa 5mm, sono raffreddati in un tunnel di raffreddamento che opera in continuo (B) fino a -80 °C o meno, utilizzando dell'azoto liquido e portando la gomma in una fase vetrosa. Questa non è una vera e propria transizione di fase ma con questo termine si indica lo stato in cui la gomma risulta fragile al punto da poter essere facilmente triturrata e sminuzzata. In un secondo momento, vengono fatti cadere in un mulino a martelli che opera ad una elevata velocità di rotazione (C). Qui i frammenti di gomma vengono ulteriormente frantumati in modo che la taglia delle particelle sia compresa in un intervallo di ampie dimensioni e, nel contempo, vengono purificati dalle inclusioni di acciaio e fibra. Poiché i granuli di gomma potrebbero essere umidi, è necessario essicarli (E) prima di lasciare il mulino e venire classificati in ben definite pezzature (F). Al fine di produrre polverino di pneumatico è necessario provvedere ad un secondo stadio di frammentazione criogenica (G). Il prodotto finale viene quindi stoccato in opportuni silos (H).

Parameter	Ambient	Cryogenic
Operating Temperature	ambient, max. 120° C	below - 80° C
Size Reduction Principle	cutting, tearing, shearing	braking cryogenically embrittled rubber pieces
Particle Morphology	spongy and rough, high specific surface	even and smooth, low specific surface
Particle Size Distribution	relatively narrow particle size distribution, only limited size reduction per grinding step	wide particle size distribution (ranging 10 mm to 0.2 mm) in just one processing step
Maintenance cost	higher	lower
Electricity Consumption	higher	lower
LN2 Consumption	N/A	0.5 – 1.0 kgLN2 per kg tire input

Tabella 4. 14: Confronto tra Lavorazione Criogenica e a Temperatura Ambiente

Questo tipo di tecnologia per la riduzione delle dimensioni richiede meno energia e meno macchinari rispetto al processo a temperatura ambiente. Un altro vantaggio è l'eliminazione di acciaio e fibre che diventa molto più semplice, portando ad un prodotto finito più pulito. La pezzatura del granulo rispetto alla lavorazione a temperatura ambiente

risulta più fine, tendenzialmente più pulito e utilizzabile in applicazioni più sofisticate. Ovviamente lo svantaggio principale di tale trattamento risiede nell'elevato costo dell'azoto liquido. Con questa tecnologia si ottengono polverini di PFU con dimensioni fino a circa 0,2 mm.

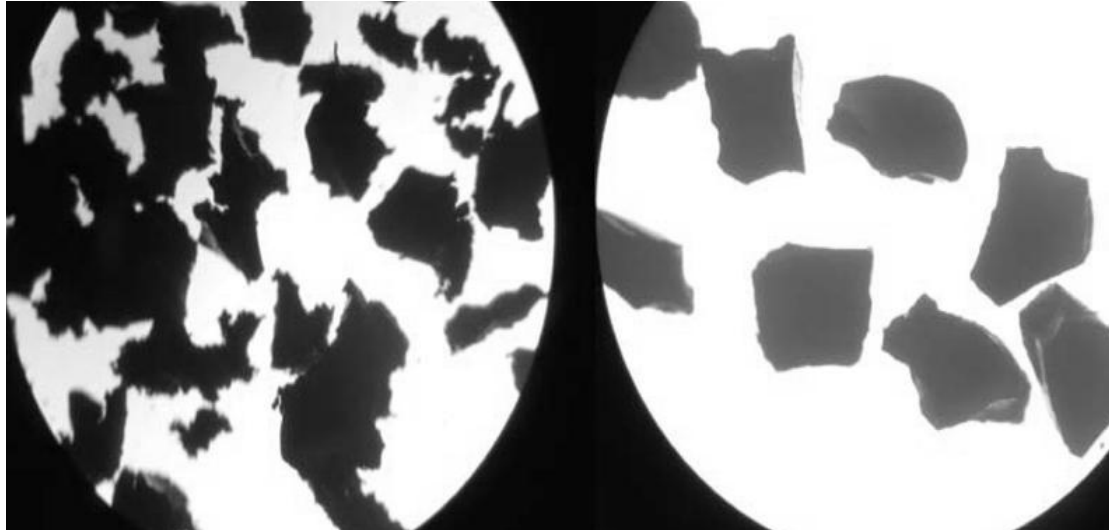


Figura 4. 22: Granuli di Gomma Triturata al Microscopio: Processo a Temperatura Ambiente (sinistra) e Criogenico (destra)

Le particelle di gomma, osservate al microscopio (Figura 4. 22), hanno una superficie più uniforme e regolare se confrontate con quelle ottenute con la granulazione a temperatura ambiente, dove invece risulta essere molto frastagliata, risultando così anche una minore superficie specifica. Ciò risulta essere importante contestualmente ad un'applicazione a freddo del polverino di gomma in conglomerati bituminosi poiché, date le note proprietà elastiche della gomma, durante la compattazione a freddo (la gomma non fonde) superfici molto frastagliate comporterebbero inevitabilmente un grado di distorsione dei granuli di gomma molto maggiore, con un prevedibile elevato ritorno elastico a seguire ed associata negativa conseguenza di azioni interne alla miscela.

4.11 CONCLUSIONI

Gli elementi che costituiscono una miscela di stabilizzato con emulsione bituminosa sono:

- 1) gli inerti: fresato e aggregati vergini;
- 2) leganti: emulsione bituminosa e cemento;
- 3) acqua.

Gli inerti formano lo scheletro di tutti gli strati che costituiscono una sovrastruttura stradale. La scelta della curva granulometrica dipende dal ruolo che la miscela deve ricoprire, di conseguenza inciderà sulle proprietà del prodotto finito.

L'emulsione bituminosa è costituita da gocce di bitume disperse in una fase continua acquosa e è stata originariamente sviluppata per superare le difficoltà di tutte le lavorazioni che richiedono il bitume caldo: riveste particolare importanza nel processo di stabilizzazione in quanto utilizzabili in ambiente umido e con inerti freddi. Una variazione di alcune sue proprietà o dosaggi può incidere nel rendimento finale della miscela e nella sua lavorabilità.

In abbinamento all'emulsione bituminosa, a seconda del ruolo che avrà la miscela nel pacchetto stradale, può essere usato il cemento Portland. Il cemento è un legante idraulico e nei conglomerati bituminosi può essere usato come filler per completare la curva granulometrica e come legante se entra a contatto con l'acqua, presente sia nell'emulsione che come acqua di aggiunta.

La presenza di cemento in una emulsione di bitume produce un effetto sinergico; l'idratazione sottrae acqua all'impasto e, poiché la reazione è esotermica, produce calore e favorisce la rottura dell'emulsione e la presa finale.

Dopo aver definito l'importanza e l'influenza di ogni elemento nel prossimo capitolo verrà descritto il programma sperimentale della presente tesi nel quale si analizzerà la possibilità di implementare nella generica miscela appena descritta certi quantitativi di polverino di gomma ed i limiti degli stessi.

CAPITOLO 5

PROGRAMMA SPERIMENTALE

5.1 *IL PROGRAMMA SPERIMENTALE*

5.1.1 INTRODUZIONE

L'indagine sperimentale proposta in questa tesi di laurea è stata condotta nel Laboratorio di Strade LAS del dipartimento DICAM, Facoltà di Ingegneria di Bologna, su materiali forniti da una società esterna interessata alla possibilità di applicazione del polverino nel settore stradale.

A seguire si fornisce la descrizione del programma sperimentale e dei diversi obiettivi della ricerca, esaminando la caratterizzazione dei materiali di base utilizzati, delle miscele confezionate e delle prove effettuate.

5.1.2 OBIETTIVI GENERALI

L'obiettivo del presente progetto di ricerca è di valutare la possibilità di inserimento di Polverino di Gomma all'interno di una miscela, confezionata a freddo con emulsione di bitume e cemento, contenente il 100% di fresato.

Lo studio fornisce indicazioni sugli effetti che la granulometria, la quantità di bitume, di emulsione e di cemento, hanno nei confronti delle principali caratteristiche meccaniche della miscela quali: Lavorabilità, Resistenza a Trazione Indiretta, Moduli di Rigidezza e di Fatica.

Va detto, innanzitutto, che questo genere di lavorazione è strettamente subordinato alle caratteristiche del fresato, materiale candidato al riciclaggio, i cui grani, oltre a dover soddisfare requisiti dimensionali, devono dimostrare buone caratteristiche meccaniche.

La presente ricerca, valutando la possibilità di impiegare con successo tecnologie a freddo eco-friendly in cui sia previsto l'uso congiunto di materiale recuperato quale il RAP e il polverino di gomma, concentra l'attenzione sulla minimizzazione dell'impatto ambientale relativo ad alcune applicazioni tipiche del settore stradale.

5.1.3 ARTICOLAZIONE GENERALE DEL PROGRAMMA

La fase della sperimentazione è stata sviluppata interamente in laboratorio dove è avvenuto il confezionamento dei provini tramite il compattatore giratorio, con dosaggi variabili di emulsione bituminosa, cemento e polverino.

L'esperienza pratica e le ormai numerose ricerche di laboratorio hanno portato fino ad oggi a lavorare con integrazioni sia di cemento, sia di emulsione comprese tra 1% e 5% in massa della miscela: supposto perciò un valore atteso di questo genere sono state scelte alcune percentuali quali candidate al confezionamento delle miscele.

Lo studio si articola in cinque fasi principali e può essere schematizzato attraverso i seguenti elementi principali:

- **Fase 1: Organizzazione del Progetto**
 - Mix design
 - Descrizione del programma e modalità di maturazione
- **Fase 2: Analisi della compattazione con Pressa Giratoria**
 - Preparazione e compattazione dei provini
 - Descrizione delle proprietà volumetriche delle miscele
- **Fase 3: Indirect Tensile Straight (ITS) test**
 - Descrizione delle modalità e delle procedure operate
 - Analisi e descrizione dei risultati
- **Fase 4: Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) test**
 - Descrizione delle modalità e delle procedure operate
 - Analisi e descrizione dei risultati
- **Fase 5: Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT)**
 - Descrizione delle modalità e delle procedure operate
 - Analisi e descrizione dei risultati di fatica

5.2 FASE 1: ORGANIZZAZIONE DEL PROGETTO

L'analisi preliminare è il punto di partenza della sperimentazione, tramite la quale sono definite le caratteristiche della miscela. Sulla base dei materiali forniti si definiscono le percentuali di aggregati da utilizzare nella miscela, da sperimentazioni precedenti si scelgono percentuali di umidità e cemento ottimali, infine si valutano gli effetti del polverino di gomma nelle miscele cercando la quantità ottimale da inserirvi.

Di seguito quindi sono descritte le proprietà fisiche e chimiche degli elementi utilizzati nella miscela, la scelta del fuso di riferimento per la definizione della curva granulometrica e le prove sopra elencate.

5.2.1 MIX DESIGN

Le miscele sono state confezionate prendendo in considerazione due tenori di cemento: 1.5% e 3.0%, mentre per quanto riguarda l'emulsione si è considerato il 3.5% e il 5%. In entrambi i casi tali percentuali sono state valutate rispetto alla massa degli aggregati. Per quanto riguarda il polverino di gomma criogenico, volendo analizzare l'effetto che lo stesso produce nella miscela, si è deciso di procedere aumentando gradualmente la percentuale di CCR (Cryogenic Crumb Ruber) nelle misure dello 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% in volume.

Complessivamente dunque sono state realizzate 24 miscele differenti:

- 1.5%¹ Cemento, 3.5%¹ Emulsione Bituminosa, CCR 0%², 1%², 2%², 3%², 4%², 5%²
- 1.5%¹ Cemento, 5.0%¹ Emulsione Bituminosa, CCR 0%², 1%², 2%², 3%², 4%², 5%²
- 3.0%¹ Cemento, 3.5%¹ Emulsione Bituminosa, CCR 0%², 1%², 2%², 3%², 4%², 5%²
- 3.0%¹ Cemento, 5.0%¹ Emulsione Bituminosa, CCR 0%², 1%², 2%², 3%², 4%², 5%²

Si sottolinea, come anticipato in precedenza, che le percentuali relative ai leganti a base cementizia e bituminosa sono espresse con riferimento alla massa degli aggregati (¹), mentre la percentuale del polverino è calcolata sul volume degli stessi (²): ciò tiene conto della notevole differenza di densità dei due materiali.

¹ Percentuale calcolata sulla massa degli aggregati
² Percentuale calcolata sul volume degli aggregati

Definiti i quantitativi operativi dei componenti, nei successivi paragrafi si fornisce la descrizione delle principali proprietà e delle specifiche caratteristiche degli stessi in modo da poter capire come interagiscono tra di loro, alla luce della trattazione generale svolta al capitolo precedente.

5.2.1.1 RAP E POLVERINO DI GOMMA (CCR)

L'aggregato utilizzato per le miscele a freddo è costituito interamente da Fresato o *Reclaimed Asphalt Pavement* (100% RAP), materiale proveniente da scarifica di pavimentazioni in conglomerato bituminoso. La distribuzione granulometrica degli aggregati è stata valutata vagliando gli stessi in appositi setacci, seguendo la procedura descritta dalla normativa UNI EN 933-1.

Il fresato è stato sottoposto inoltre a prove di estrazione del bitume invecchiato residuo, di cui sono ricoperte le sue particelle, ricercandone le caratteristiche, in particolare la penetrazione in dmm, e valutandone il grado di ossidazione.

Apertura Vaglio (mm)	Passante (%)
31.5	100
20	98
16	96
14	95
12.5	94
10	88
8	83
6.3	77
4	61
2	42
1	30
0.25	17
0.063	6.9

Tabella 5. 1: Granulometria originale del RAP

Dai test si è riscontrato un bitume residuo molto duro con grado di penetrazione leggermente inferiore a 10 dmm.

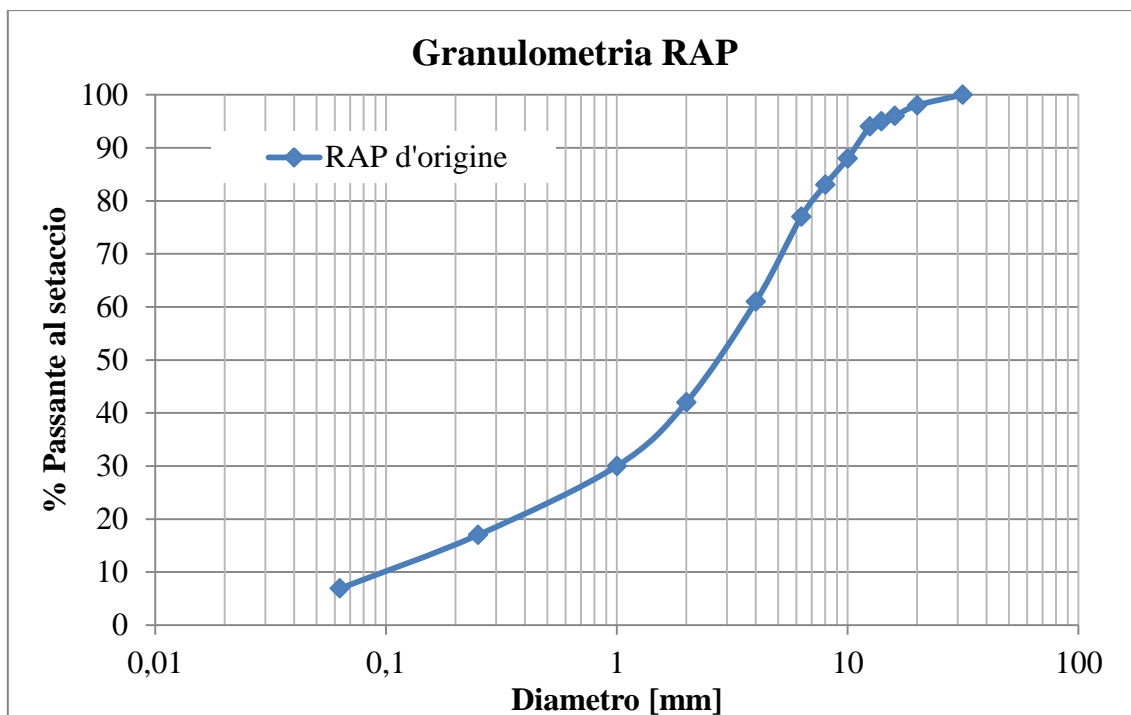


Figura 5. 1: Granulometria RAP d'origine

Si nota che la dimensione massima degli aggregati non supera i 30 mm circa, conformemente alle indicazioni tecniche circa i limiti dimensionali degli aggregati utilizzabili per il confezionamento a freddo di conglomerati bituminosi.

Il polverino di gomma criogenico, prodotto tramite omonima granulazione degli pneumatici descritta in precedenza, presenta le caratteristiche riportate in Tabella 5. 2 e Figura 5. 2.

Serie	Setacci			% Trattenuto	% Passante
	mesh	μm	mm		
-	-	1000	1	0	100
ISO	20	850	0,85	0	100
ASTM	25	710	0,71	10	90
ASTM	30	590	0,59	12	78
ASTM	35	500	0,5	31	47
ASTM	40	425	0,425	12	35
ASTM	50	297	0,297	18	17
ASTM	100	149	0,149	15	2
-	<100	< 149	<0,149	2	0

Tabella 5. 2: Granulometria del Polverino (CCR)

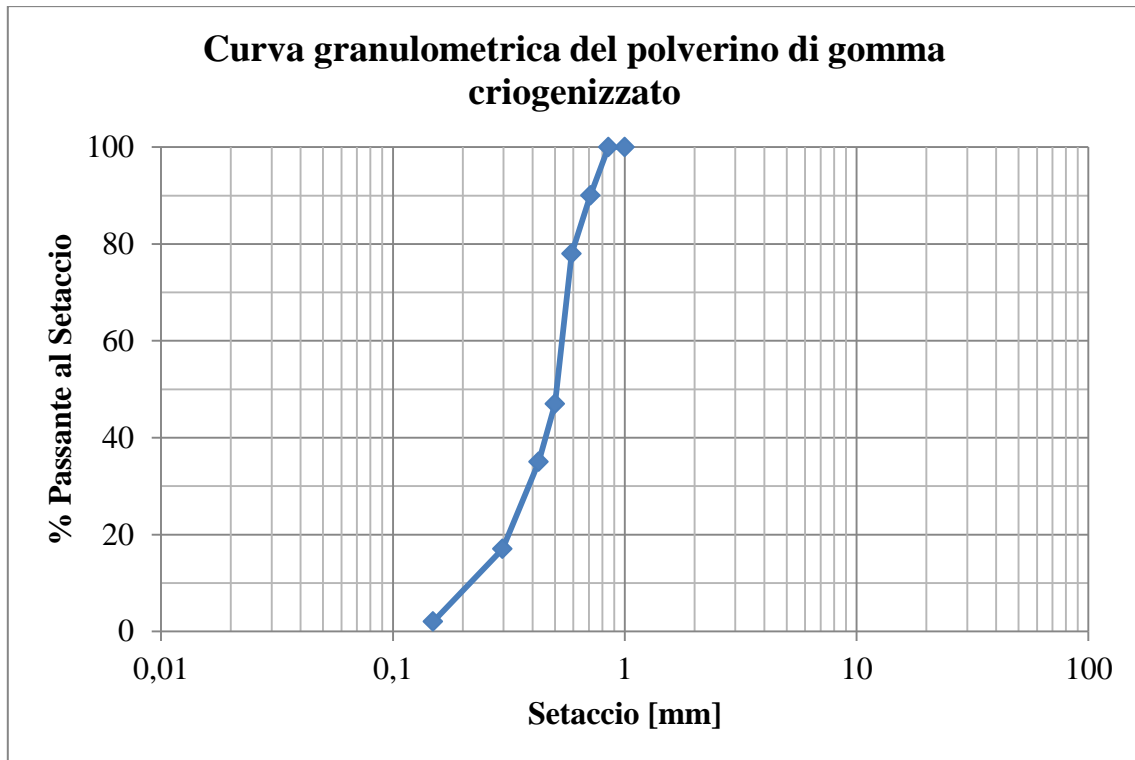


Figura 5. 2: Granulometria polverino di gomma criogenico

Per conseguire un elevato grado di addensamento delle miscele, ai fini dell'ottenimento di elevate caratteristiche meccaniche e una conseguente maggiore vita utile dell'infrastruttura viaria, è necessario affinare la curva del RAP, in modo che risulti ben assortita, cioè composta da sensibili percentuali per ogni tipo di pezzatura (Figura 5. 3). Tra le diverse relazioni presenti in letteratura, che permettono di determinare la curva di massimo addensamento, si è adottata quella di Fuller:

$$P = \left[\frac{d}{D} \right]^n * 100$$

Dove: d= apertura setaccio considerato

P = percentuale, sulla massa, del passante al setaccio d mm

D = massima dimensione delle particelle

n = coefficiente di gradazione dipendente dalle caratteristiche di addensamento del materiale; qui si è adottato n=0,5

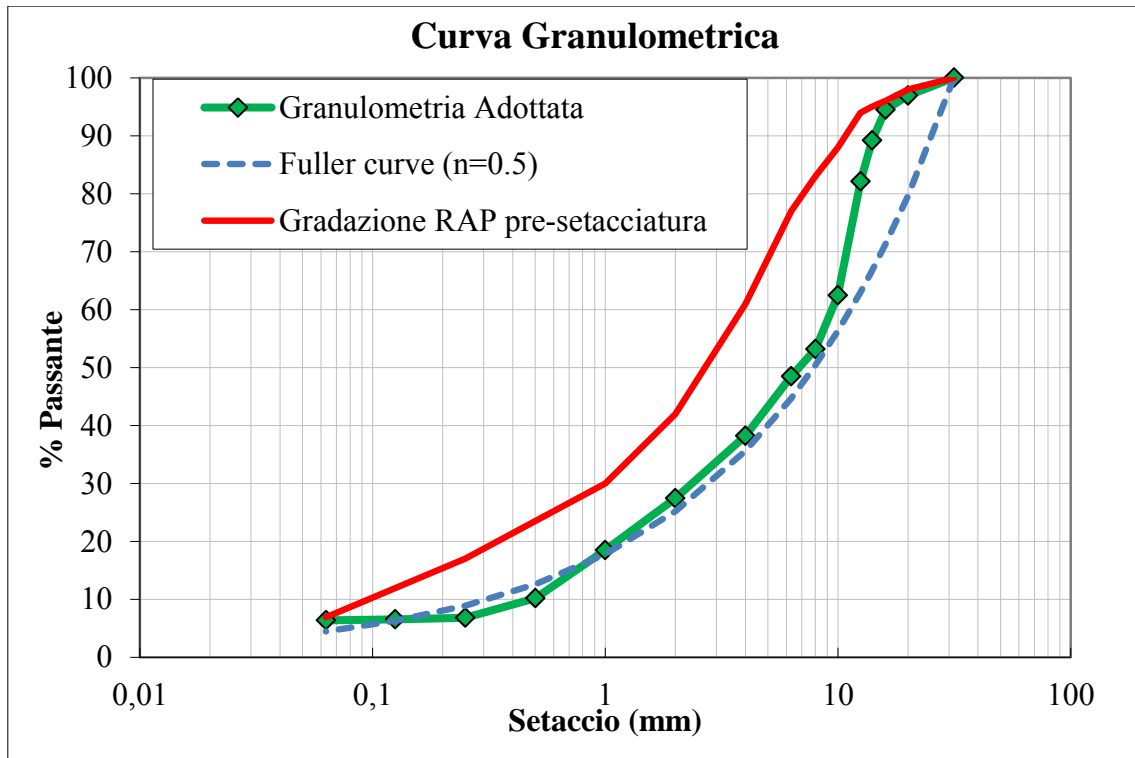


Figura 5. 3: Confronto tra la curva di massimo addensamento (Fuller), quella adottata per la miscela e quella del fresato pre-setacciatura

Facendo riferimento alla curva di massimo addensamento, gli aggregati del Fresato sono stati sottoposti ad accurata setacciatura in laboratorio, secondo tre ordini di grandezza, dividendoli nelle tre classi seguenti:

- RAP 10 - 10+ ;
- RAP 5 - 10 ;
- RAP 0 - 5 .



Figura 5. 4: Granulometria delle tre classi di RAP

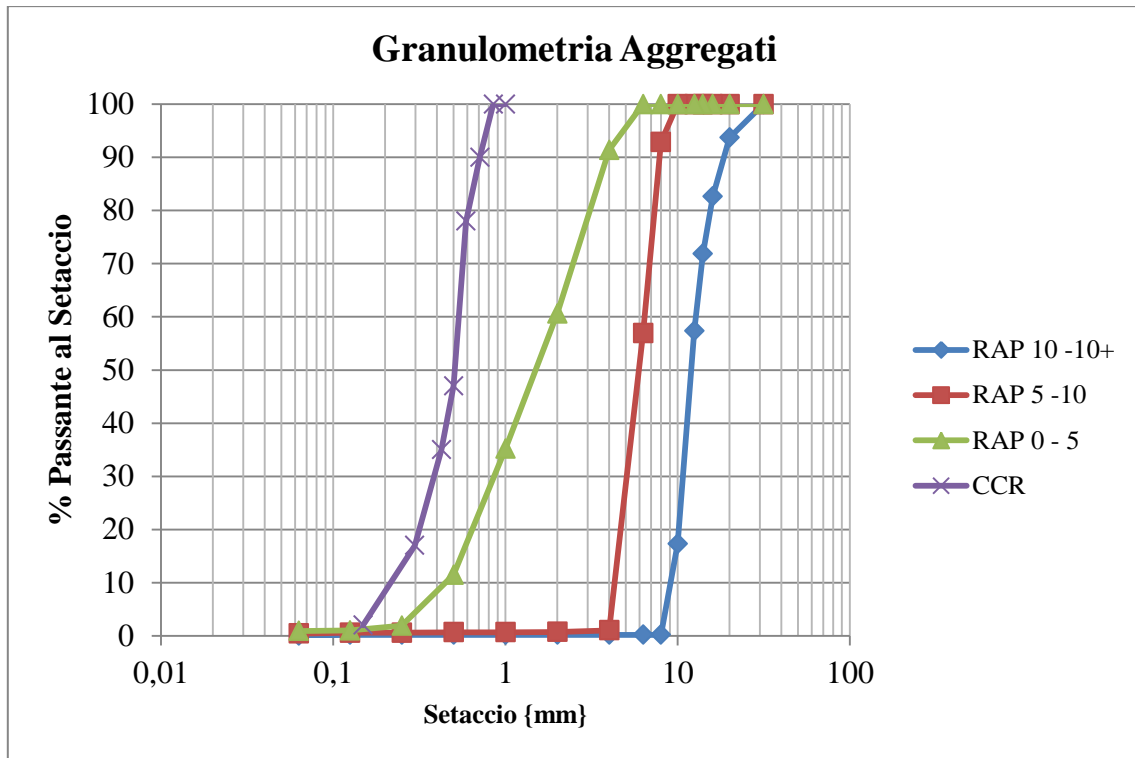


Figura 5. 5: Granulometria delle tre classi di RAP e CCR

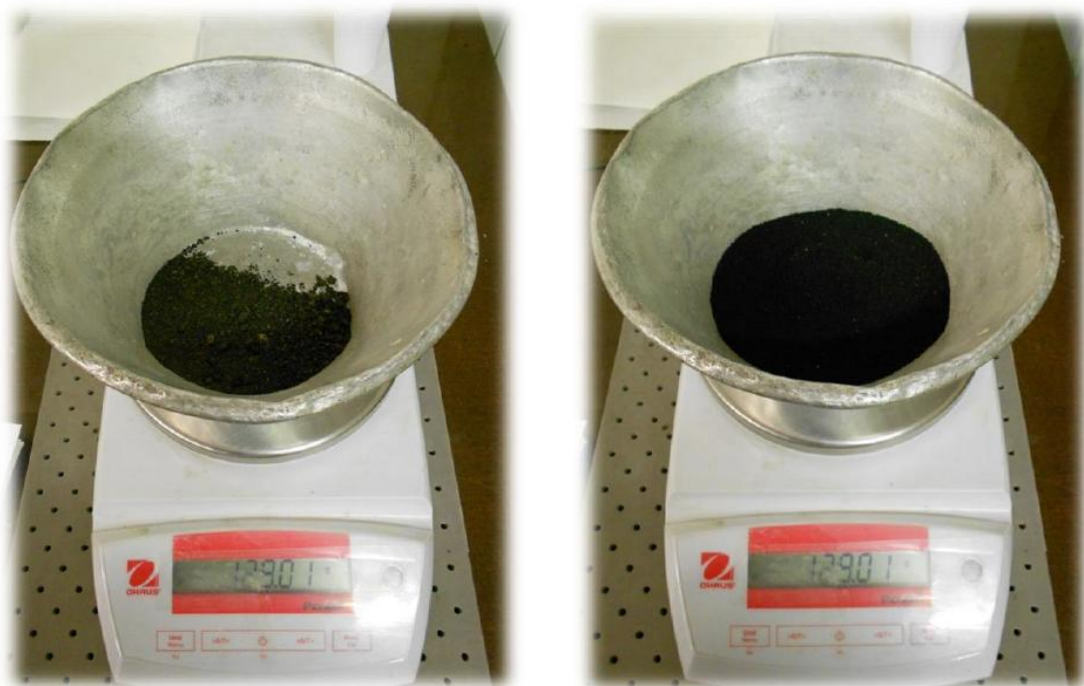


Figura 5. 6: Confronto tra volume del RAP fine (sx) e del polverino (dx), a parità di massa



Figura 5. 7: Esempio della quantità di CCR contenuta nei provini (3%)

Il polverino di gomma è stato utilizzato per sostituire in volume parte della frazione fine del RAP (RAP 0-5).

Dalla miscela di progetto del RAP, sono state sottratte quantità variabili della frazione fine “RAP 0-5” calcolate come percentuale rispetto al peso degli aggregati, e successivamente rimpiazzate a parità di volume dal Polverino (Figura 5. 7). Il computo delle quantità è stato effettuato sulla base del rapporto tra il Peso di Volume Reale del Fresato e quello del Polverino. I pesi di volume del RAP e del CCR, sono stati determinati in laboratorio mediante metodo picnometrico, ottenendo un valore per il RAP di 2.530 g/cm³ e per il polverino di 1.080 g/cm³.

Il rapporto suddetto è risultato quindi pari a ≈ 2.34 .

A seconda della percentuale di CCR le quantità inserite possono essere riassunte nella seguente tabella:

% RAP sostituito da CCR	0	1	2	3	4	5
Peso RAP "Fine" sottratto [g]	0	43	86	129	172	215
Peso CCR aggiunto [g]	0,00	18,35	36,71	55,06	73,41	91,76

Tabella 5. 3: Quantità di RAP fine sottratto e Quantità di CCR aggiunto alla miscela di progetto

5.2.1.2 CEMENTO E FILLER

E' stato impiegato cemento Portland pozzolanico, con classe di resistenza 32.5 N/mm², ed inerte calcareo di cava quale filler.

La quantità totale di filler aggiunto (cemento e filler calcareo vero e proprio), prescindendo dalla sua origine e dalla sua attività/inattività, è stato mantenuto sempre costante, in tenore del 3%. Conseguentemente per le miscele contenenti una percentuale di solo cemento del 3% non è stato aggiunto filler calcareo, mentre per le miscele contenenti cemento in tenore del 1.5% si è adottato un tenore di filler di 1.5%.

5.2.1.3 L'EMULSIONE BITUMINOSA

L'emulsione bituminosa utilizzata, è la commerciale RIGEVAL CM SBS ed è stata fornita dalla VALLI ZABBAN s.p.a., società leader in Italia nella produzione di leganti bituminosi per uso stradale. Il bitume di base è modificato con polimeri SBS, in emulsione cationica, sovrastabilizzata, specifica per la realizzazione di conglomerati bituminosi a freddo contenenti cemento Portland 325 e/o calce idrata (Tabella 5. 4).

CARATTERISTICHE DEL'EMULSIONE	NORMA DI RIFERIMENTO	UNITA' DI MISURA	VALORI NOMINALI
Viscosità a 40°C (tempo di efflusso tazza 2mm)	UNI EN 12846	sec	40
Effetto dell'acqua sull'adesione	UNI EN 13614	%	95
Indice di rottura (metodo del filler minerale)	UNI EN 13075-1	%	210
Stabilità alla miscelazione con cemento	UNI EN 12848	%	< 2,0
CARATTERISTICHE DEL LEGANTE RECUPERATO TRAMITE EVAPORAZIONE (EN 13074)	NORMA DI RIFERIMENTO	UNITA' DI MISURA	VALORI NOMINALI
Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm	55
Consistenza alle temperature elevate di esercizio Punto di Rammollimento	UNI EN 1427	°C	62
Coesione Force ductility Test a 5°C	UNI EN 13703	J/cm2	6,5

Tabella 5. 4: Caratteristiche dell'emulsione bituminosa e del bitume in essa contenuto

5.2.1.4 L'ACQUA

L'acqua impiegata dovrà essere esente da impurità dannose, oli, acidi, alcali, materia organica e qualsiasi altra sostanza nociva.

5.2.1.5 DEFINIZIONE DELL'UMIDITÀ OTTIMA, DENSITÀ SECCA E QUANTITÀ DI CEMENTO

Per la valutazione del costipamento di un terreno, e la valutazione dell'influenza del contenuto d'acqua sullo stesso, in laboratorio viene utilizzata la Prova Proctor normata dall'UNI EN 13286-2 seguendo la metodologia AASHTO.

Interessa in particolare determinare la massima massa volumica (densità) ottenibile per costipamento della frazione secca della terra e il corrispondente livello di umidità, detto di "umidità ottima".

Il campione è inserito in una fustella cilindrica di dimensioni note e viene compattato mediante un pestello di peso noto che cade da altezza definita.

A costipamento ultimato si misura il contenuto d'acqua della terra e la sua densità secca, data dal rapporto tra la massa del materiale essiccato in stufa ed il volume dello stesso a costipamento avvenuto. La prova viene ripetuta su campioni dello stesso materiale con contenuti d'acqua via via crescenti, ottenendo diversi valori della densità secca.

I dati ottenuti dalle diverse prove vengono poi riportati su un grafico con andamento a campana classico della prova Proctor, tipo quello in Figura 5. 8, che presenta in ascissa il contenuto d'acqua e in ordinata la densità secca.

Dallo studio della curva si determina il "contenuto ottimo d'acqua" in corrispondenza del quale si ha la massima densità della terra presa in esame.

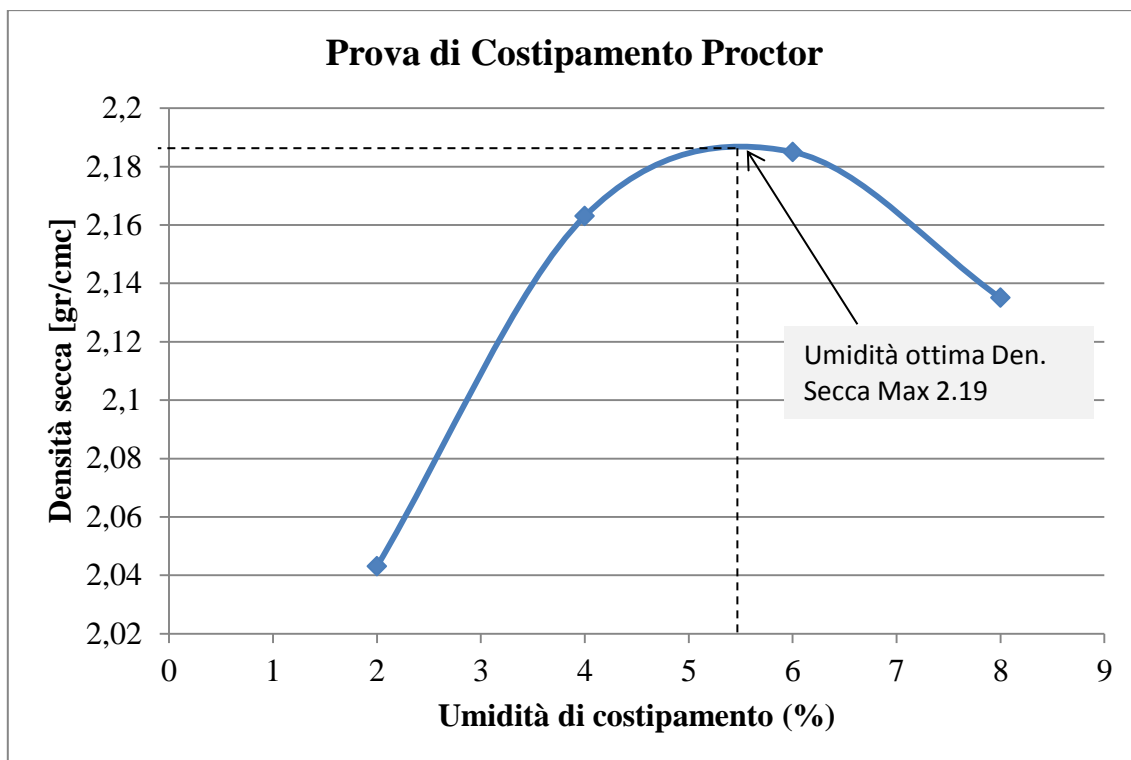


Figura 5. 8: curva di addensamento tipica della Prova Proctor

La spiegazione di questa curva si può avere intuitivamente considerando le tre fasi, solida (grani), liquida (acqua) e gassosa (aria) che coesistono in una terra. Quando questa è asciutta i grani si assestano per effetto del costipamento rimanendo indipendenti l'uno dall'altro, lasciando, quindi, una notevole quantità di vuoti. L'acqua rivestendo i vari grani con sottili pellicole aventi elevata tensione superficiale sviluppa quel mutuo legame tra i grani stessi, che permette un loro maggiore addensamento (effetto lubrificante). Tale effetto aumenta all'aumentare della percentuale di acqua fino ad un certo punto, cioè per un certo valore di umidità detta ottima in cui si raggiunge il massimo addensamento compatibile con quella energia mediante la quale si opera il costipamento. Aumentando ancora la quantità di acqua oltre tale percentuale ottima, si verifica un nuovo allontanamento dei vincoli reciproci tra i grani, sicché si torna ad avere una minore densità (l'acqua si oppone al costipamento).

Come per l'acqua, i dosaggi dei leganti vengono indicati in percentuale poiché si deve specificare la massa di legante da usare rispetto alla massa totale degli aggregati impiegati. La quantità di cemento è stata definita in due percentuali prefissate, quantità pari a 1.5% e 3%, sulla scorta di esperienze precedenti al presente studio, nelle quali è stato valutato il legame tra i risultati di prove di trazione e compressione su provini cilindrici e le percentuali stesse. La scelta del quantitativo ottimale di emulsione è condotta su due percentuali prefissate considerando vari aspetti fisici e meccanici tra cui la lavorabilità, la resistenza a trazione indiretta, la rigidità ITSM e la resistenza a fatica ITFT.

Una considerazione molto importante che riguarda la realizzazione dei campioni deve essere fatta sulla quantità di acqua da utilizzare in funzione della quantità di emulsione impiegata. Occorre innanzi tutto dire che il bitume dell'emulsione, pur avendo una densità simile all'acqua, ha una viscosità variabile in funzione delle sue caratteristiche di consistenza e dei saponi emulsivi. Esso può pertanto essere compreso o meno nella fase liquida che concorre al raggiungimento dell'umidità ottima. Sulla scorta quindi di numerose esperienze e ricerche di laboratorio e in accordo con la consolidata pratica tecnica di settore, nella presente sperimentazione si è cercato di adoperare una fase liquida totale tra il 5.5 e il 6%, rivelatosi il quantitativo ottimale, tenendo conto del tenore di legante ed operando le correzioni richieste tramite l'aggiunta di piccole quantità di acqua.

Non da ultimo è da sottolineare l'importanza di una valutazione visiva della miscela da parte degli esperti del settore, in modo del tutto simile a quanto accade effettivamente nelle operazioni in cantiere.

5.2.2 DESCRIZIONE DEL PROGRAMMA E MATURAZIONE

Per ognuna delle 24 miscele descritte al paragrafo 0 sono stati preparati un totale di 3 provini aventi diametro pari a 150 mm, la cui compattazione è avvenuta tramite pressa giratoria: 180 giri di rivoluzione alla pressione di 600 kPa e angolo esterno di inclinazione dello stampo pari a 1.25°, come meglio esplicitato nel proseguo. I 72 provini così ottenuti, sono stati sottoposti quindi al test di Resistenza a Trazione Indiretta (Indirect Tensile Strength, ITS), successivamente alla loro maturazione.

Oltre al test ITS, questo studio vuole fornire informazioni anche sui Moduli di Rigidezza e sul Comportamento a Fatica delle miscele. In quest'ottica si è deciso di procedere ad un confronto tra il materiale privo di polverino e quello nel quale era presente in tenore del 3%. La scelta di utilizzare il 3% di CCR come percentuale per i test dinamici, nasce dal compromesso tra lavorabilità, resistenza meccanica e aspetti economici.

La realizzazione dei test per la determinazione del Modulo di Rigidezza (indirect tensile stiffness modulus, ITSM) e per le prove dinamiche di valutazione del Comportamento a Fatica (indirect tensile fatigue tests, ITFT), ha richiesto il confezionamento di ulteriori 48 provini;. Il numero di questi provini dipende dal fatto che per ognuna delle 4 miscele, ottenute variando le dosi di Cemento (1.5%, 3.0%) e il tenore di Emulsione Bituminosa (3.5%, 5.0%), per le 2 percentuali di Polverino di Gomma (0%, 3%), sono necessari 6 provini per la costruzione delle curve a fatica.

Si fa notare che in realtà le curve di fatica, sono costruite come verrà spiegato meglio in seguito, analizzando per 3 valori di carico, il numero di cicli necessari per il raggiungimento della rottura del provino. Questi risultati inoltre sono ottenuti dalla media di tre prove indipendenti l'una dalle altre. Per poter costruire una curva di fatica, sono

quindi necessari 9 campioni su cui eseguire i test ai quali se ne aggiungono 3 di scorta (uno per ogni valore di carico) per un totale di 12 provini per miscela.

Tal numero, è stato raggiunto partendo dai 48 campioni realizzati (6 per miscela) e procedendo poi ad un taglio mediante mola circolare in due parti di egual dimensione; in questo modo i provini sottoposti a test ITSM e ITFT risultano essere complessivamente 96.

Il taglio del provino è stato effettuato nel rispetto della norma UNI EN 12697-24 che descrive le modalità operative per l'esecuzione di test a fatica su provini cilindrici. Tale norma riporta le dimensioni minime dei provini in funzione della dimensione massima degli aggregati.

Nel caso specifico, per provini con aggregati di dimensione massima di 38 mm, la norma prescrive uno spessore minimo del provino di 60 mm e un diametro di 150 ± 3 mm.

Tutti i campioni, sono stati fatti maturare in una busta ermetica, in modo da mantenere l'umidità, per 3 gg. in stufa a 40° . Allo scadere di questo periodo, si è rimossa la busta e si sono lasciati maturare sempre in stufa per altri 3 gg. (Figura 5. 9). Estratti dalla stufa, i provini hanno completato la maturazione a temperatura di 25° , fino alla completa stabilizzazione del loro peso.



Figura 5. 9: Alcuni provini imbustati al termine dei primi 3 gg. di maturazione in stufa

5.3 FASE 2: REALIZZAZIONE DEI CAMPIONI E ANALISI DELLA COMPATTAZIONE CON PRESSA GIRATORIA

5.3.1 LA PREPARAZIONE DEI PROVINI

5.3.1.1 PREPARAZIONE DELLA MISCELA

La realizzazione dei provini di riciclato a freddo con emulsione bituminosa, cemento e polverino di gomma, è stata effettuata presso il laboratorio LAS (Laboratorio di Strade) del DICAM (Dipartimento Ingegneria Civile, Ambientale dei Materiali) dell'Università di Bologna. Durante la preparazione, si è cercato di riprodurre il più fedelmente possibile, il processo lavorativo in sito.

Così come evidenziato al paragrafo 0, verranno realizzati 120 provini cilindrici secondo il riassunto in tabella:

% Cemento	% Emulsione	% CCR	N° di Provini	% Cemento	% Emulsione	% CCR	N° di Provini
1.5	3.5	0	3 + 6	3.0	3.5	0	3 + 6
		1	3			1	3
		2	3			2	3
		3	3 + 6			3	3 + 6
		4	3			4	3
		5	3			5	3
1.5	5	0	3 + 6	3.0	5	0	3 + 6
		1	3			1	3
		2	3			2	3
		3	3 + 6			3	3 + 6
		4	3			4	3
		5	3			5	3

Figura 5. 10: Tabella Riassuntiva del Programma per la Realizzazione dei Campioni

Il diametro di tutti i provini, è pari a 150 mm ed è determinato dalle dimensioni della fustella utilizzata nella pressa giratoria, mentre l'altezza è quella corrispondente alla 180-esima girazione, variabile in funzione delle percentuali componenti le miscele e della

suscettibilità all'addensamento delle stesse. Da ciò segue che ogni provino raggiungerà una sua propria densità finale.

E' importante sottolineare, a questo proposito, la tendenza dei provini contenenti polverino di gomma ad un ritorno elastico tramite il quale recuperano una frazione della loro altezza finale di compattazione, risultata mediamente circa il 3%. Conseguentemente, saranno affetti da piccole variazioni di densità.

Sulla base di queste informazioni, seguendo la normativa di riferimento e conoscendo le percentuali delle altre componenti si sono determinate le quantità in peso di fresato, aggregato vergine, cemento Portland, emulsione bituminosa ed acqua. La miscelazione di tutti gli elementi, operazione fondamentale per l'ottenimento di un impasto il più possibile omogeneo, si è svolta seguendo una procedura prestabilita definita secondo i seguenti passi:

1. dosaggio e collocazione in una teglia delle varie pezzature del fresato nel rispetto della curva granulometrica di progetto;
2. accorpo dell'acqua di correzione necessaria al raggiungimento dell'umidità ottimale e successiva miscelazione con il RAP;
3. costituzione di uno "slurry" tramite impasto del cemento Portland e dell'acqua;
4. aggiunta dello "slurry" cementizio all'emulsione bituminosa e miscelazione;
5. aggiunta dei leganti al fresato (Figura 5. 11, centro) ed ultima miscelazione fino a completa ed uniforme dispersione della fase liquida (Figura 5. 11, destra);
6. collocazione del conglomerato in una fustella di diametro 150 mm (Figura 5. 12, sinistra);

7. compattazione del conglomerato mediante pressa a taglio giroscopico o pressa giratoria (Figura 5. 12, destra).

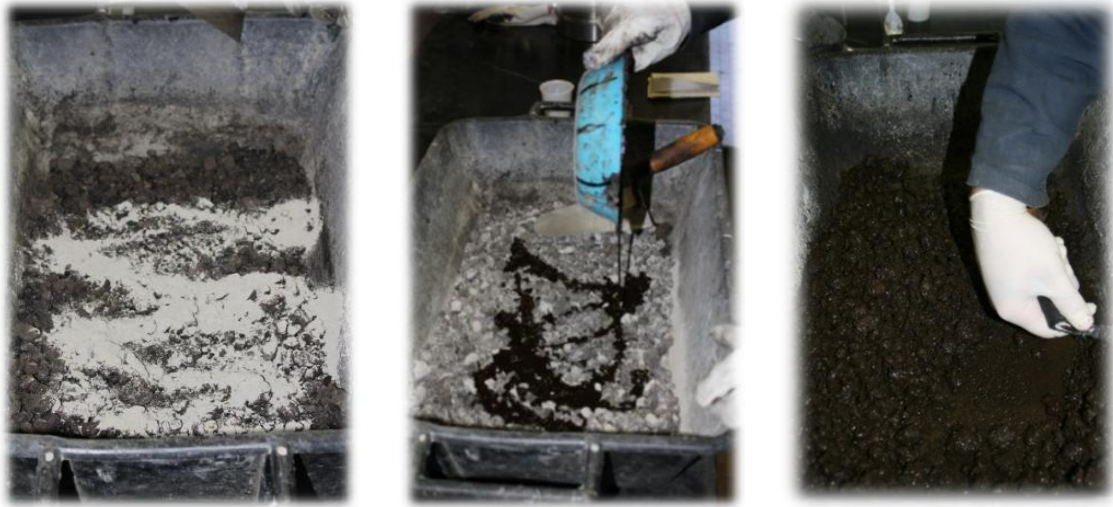


Figura 5. 11: aggiunta del Filler (sinistra), dei leganti (centro) e miscelazione (destra)



Figura 5. 12: collocazione del conglomerato nella fustella (sinistra) e compattazione con pressa giratoria (destra)

Talvolta, è stato necessario limitare la quantità di cemento impiegata nello “slurry” che sarebbe altrimenti risultato troppo denso e pastoso per consentire un’adeguata miscelazione, cospargendo quindi la frazione residua sugli aggregati.

Il filler è invece sempre stato cosperso sugli aggregati fresati precedentemente all’aggiunta dei leganti (Figura 5. 11, sinistra).

Relativamente al polverino di gomma, la sua incorporazione nella miscela come componente è avvenuta per mezzo di un passaggio intermedio nel quale è stato aggiunto allo “slurry” di cemento ed acqua (punto 3), per poi essere miscelato con l’emulsione bituminosa solo successivamente, percorrendo infine gli stessi passaggi finali.

La scelta di inserire il polverino di gomma nello “slurry” e non nell’emulsione bituminosa, nasce dall’esigenza di avere una miscela uniforme, che non si otterrebbe versandolo direttamente nella emulsione, a causa della sua tendenza al galleggiamento.

5.3.1.2 DENOMINAZIONE DEI PROVINI

Per identificare i provini e riconoscerli senza generare errori è stata utilizzata una sigla alfanumerica sintetica del tipo 03FA_0R_3.0C_5.0E dove sono raggruppate tutte le caratteristiche determinanti dei provini confezionati. Nel nome di riconoscimento (Figura 5.13) è indicato il numero del provino, la serie del provino, la % di polverino di gomma, la % di cemento Portland e la % di emulsione bituminosa.

Ad esempio:

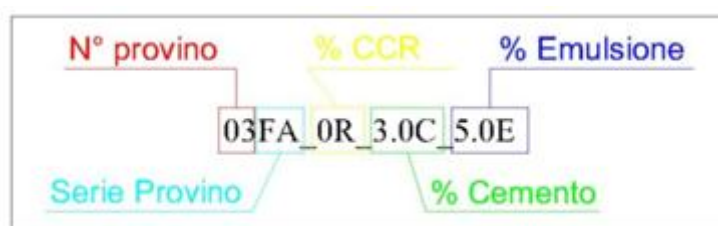


Figura 5.13: schema del nome di identificazione di un provino

dove:

- N° provino: il confezionamento dei provini è avvenuto per serie, ognuna delle quali è costituita da 12 provini, tale indicatore permette di distinguerli nella singola serie.
- Serie Provino: la sigla composta da due lettere, permette di identificare durante le lavorazioni e le analisi, la serie di riferimento.
- % CCR: il numero che precede la lettera R, specifica la quantità di polverino di gomma contenuto nel campione.
- % cemento: il numero che precede la lettera C, specifica la quantità di cemento contenuto nel campione.
- % emulsione: il numero che precede la lettera E, specifica la quantità di emulsione contenuto nel campione.

5.3.1.3 CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI CON PRESSA GIRATORIA (SECONDO NORMA UNI EN 12697-31)

I compattatori a taglio giroscopici sono apparecchiature in grado di produrre campioni cilindrici di conglomerato bituminoso aventi caratteristiche di addensamento e di distribuzione interna dei granuli di aggregato molto simili a quelle ottenute in sito mediante compattazione con rulli di cantiere.

Il conglomerato bituminoso collocato all'interno della fustella è sottoposto ad una pressione di addensamento verticale uniforme, la cui risultante avrà una direzione di applicazione inclinata rispetto all'asse della fustella, essendo quest'ultima inclinata di un angolo prefissato rispetto alla verticale. Simultaneamente, durante il processo di compattazione, il meccanismo di rivoluzione caratteristico della macchina distribuisce tale inclinazione della fustella uniformemente attorno al proprio asse, ad una velocità costante prefissata (Figura 5. 14).

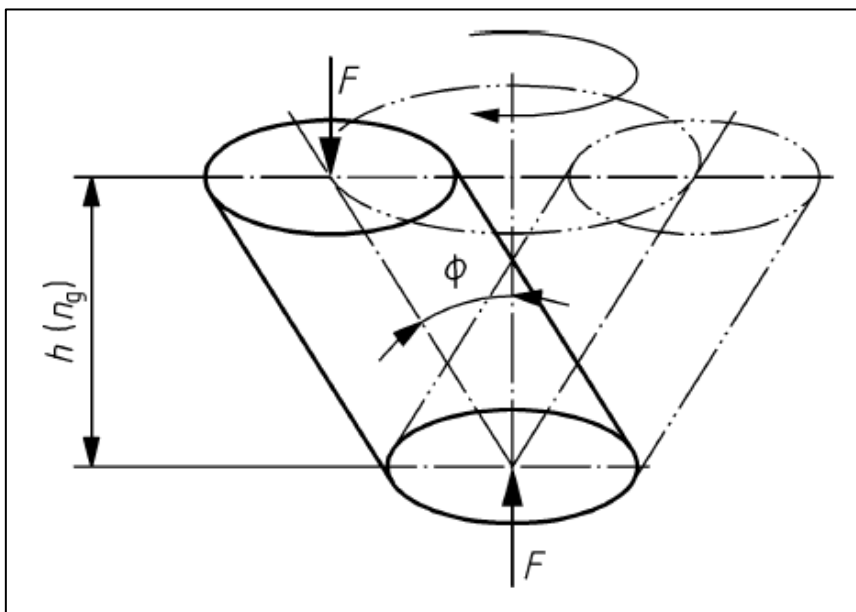


Figura 5. 14: schema di applicazione del carico mediante pressa giratoria

Durante il processo di addensamento con la tecnica giratoria, il conglomerato bituminoso subisce una continua riorganizzazione interna degli elementi costituenti che lo portano ad assumere configurazioni corrispondenti a strutture sempre più dense al fine di ottenere campioni sempre più rappresentativi del materiale che verrà posto in opera dai mezzi di cantiere.

Mediante l'impiego di tecniche di compattazione impulsive quali la metodologia Marshall, viene indotto un progressivo avvicinamento dei granuli che si interrompe all'atto della formazione di zone di saldo contatto.

La compattazione giratoria determina invece un mutuo incastro tra i grani dell'aggregato, formando così strutture granulari aventi una distribuzione dei vuoti la cui forma ed entità è simile a quella che si registra in sito (Figura 5. 15)

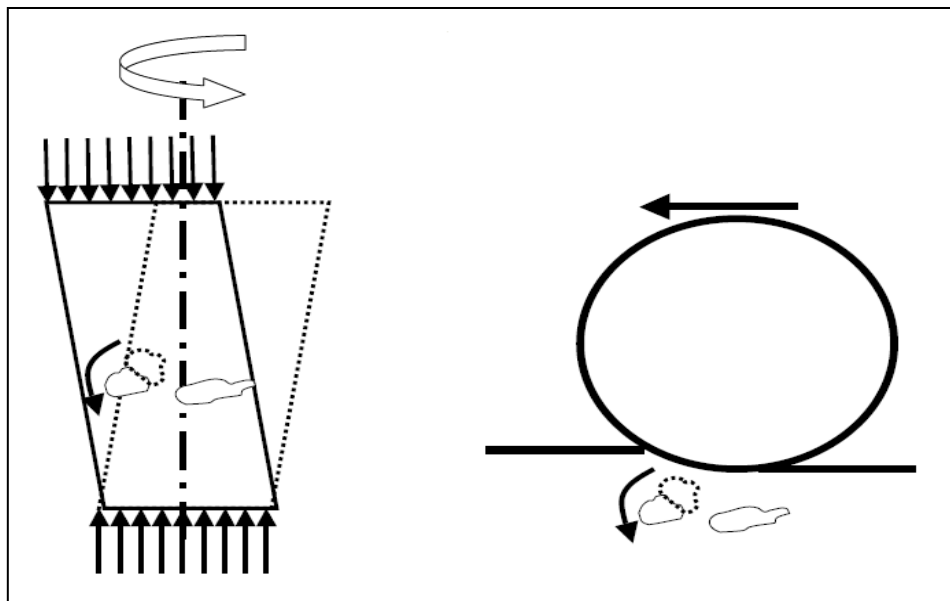


Figura 5. 15: effetto della compattazione giroscopica in analogia con l'addensamento in sito

Occorre sottolineare che nella letteratura tecnica legata all'utilizzo della pressa giroscopica viene data grande importanza allo stato di addensamento finale raggiunto dal conglomerato bituminoso al termine del fenomeno di compattazione, ma anche alle modalità con le quale tale stato limite viene raggiunto (è possibile valutare le proprietà

volumetriche durante il processo di compattazione). Le modalità da seguire per un corretto confezionamento dei provini e loro compattazione mediante pressa giratoria sono racchiuse all'interno dei due seguenti riferimenti normativi:

- Normativa UNI EN 12697-10, “Bituminous Mixture – Test method for hot mix asphalt – Part 10: Compactability”;
- Normativa UNI EN 12697-31, “Bituminous Mixture – Test method for hot mix asphalt – Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor”.

Analizzando le curve di addensamento ottenute dai dati registrati dal software della pressa, in particolare i grafici che riportano in ascissa, in scala logaritmica, il numero di giri di addensamento ed in ordinata la percentuale di densità massima teorica raggiunta (G_{mm}) (Figura 5. 16). La relazione analitica che lega i parametri di compattazione è la seguente:

$$G_{mm} (\%) = G_{mm1} (\%) + K \log n$$

Dove: G_{mm1} rappresenta l'addensamento dopo un giro (auto addensamento)

K : rappresenta la pendenza della curva di addensamento

n : rappresenta il numero di giri compiuto dalla fustella

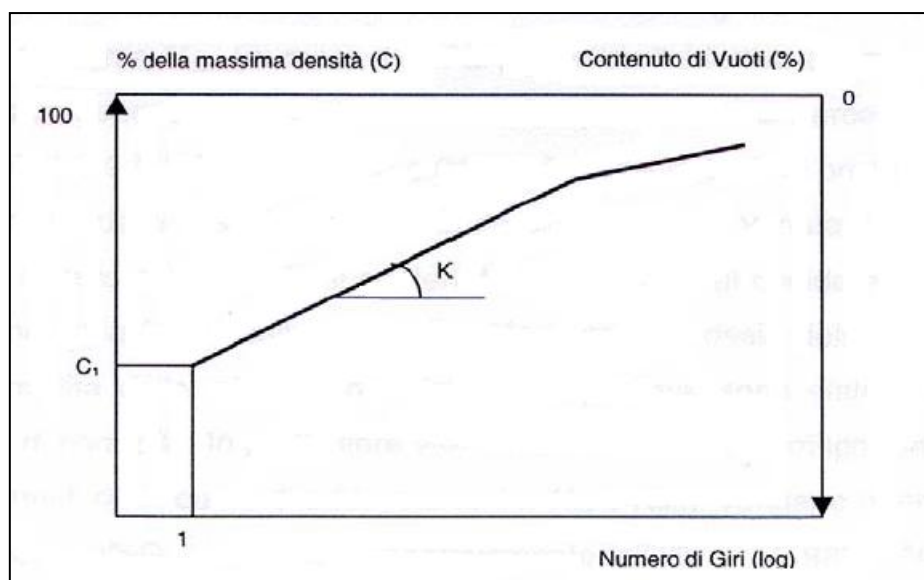


Figura 5. 16: esempio di una curva di addensamento ottenuta dalla compattazione con pressa giratoria

Analizzando le curve di compattazione si possono trarre alcune importanti considerazioni riguardanti la lavorabilità della miscela e l'addensabilità del materiale rispettivamente espresse dal valore K e da G_{mm1} .

Il compattatore giroscopico impiegato nella sperimentazione è prodotto dalla Pine Instrument Company di Grove city, presenta caratteristiche conformi alle prescrizioni tecniche delle norme SHRP per ciò che riguarda l'angolo di inclinazione della fustella, la pressione e la velocità di rotazione. La Figura 5. 17 illustra le parti meccaniche responsabili della compattazione. In essa si possono vedere le parti terminali della pressa evidenziate in verde ed il sistema meccanico rotante composto da tre bracci principali indicati in rosso: due fissi solidali alla base rotante e l'altro mobile in grado di inclinare la fustella dell'angolo prestabilito. Quest'ultima, raffigurata nell'immagine di destra, è conformata in modo tale che i cuscinetti possano imprimere l'inclinazione tramite la guida di rotolamento e si completa con le basi che trattengono il materiale compattato all'interno della fustella stessa.

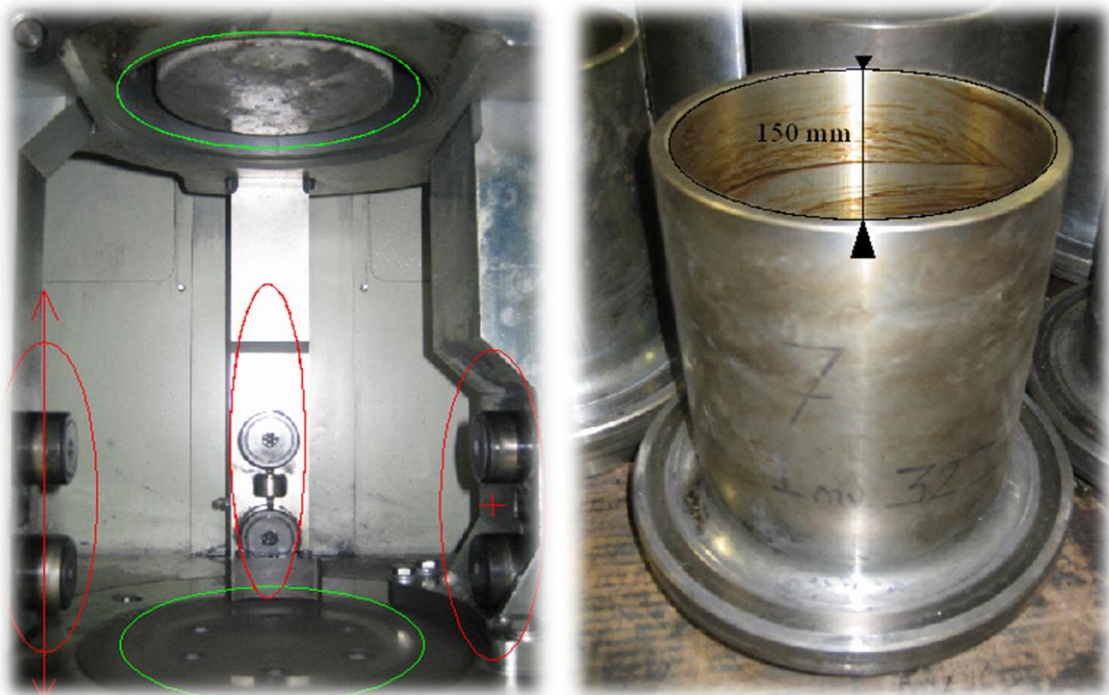


Figura 5. 17: foto interna della pressa giratoria (sinistra) e della fustella (destra)

Nella Tabella 5. 5 sono riportate le principali caratteristiche tecniche del compattatore in esame.

Pressione	200/1000 kPa \pm 18 kPa
Angolo di inclinazione	0.50/2.00° \pm 0.02°
Velocità di rotazione	30 \pm 0.5 giri/min
Massimo numero di giri	999
Diametro e altezze delle fustelle	100 + 0.0 / -0.1 mm x 200 mm 150 + 0.0 / -0.1 mm x 250 mm
Metodo operativo	A numeri di giri A controllo altezza del campione

Tabella 5. 5: caratteristiche tecniche della pressa giratoria

Il metodo operativo riguardante il confezionamento dei provini è basato sul controllo del numero di giri, che può essere preimpostato come tutti gli altri parametri di controllo. Si è deciso di adottare 180 rotazioni, impostando quindi il bloccaggio del costipamento al raggiungimento di tale ciclo terminale. Alla pressione di compattazione, all'angolo di inclinazione dell'asse di rotazione e alla velocità di rotazione sono stati assegnati i seguenti valori: 600 kPa, 1° 25' e 30 giri/min.

5.3.1.4 ADDENSAMENTO E LAVORABILITÀ

Nel riciclaggio a freddo non possono essere sottovalutati la lavorabilità e l'addensabilità dei conglomerati bituminosi. Tra i limiti di questa metodologia di recupero delle pavimentazioni vi è proprio la difficoltà di impastare i componenti della miscela e di costipare il materiale una volta steso.

Come noto, la lavorabilità della miscela è funzione della umidità, maggiore l'umidità, maggiore è la lavorabilità.

L'emulsione bituminosa che si presenta in uno stato liquido, da sola può non essere sufficiente a fornire un'adeguata lavorabilità. Adottare maggiori percentuali d'emulsione, comporta un aumento delle difficoltà nel processo di lavorazione. Anche l'OPC presente nella miscela, riduce ulteriormente la lavorabilità.

Per ovviare a tale inconveniente si può operare in due modi:

- fornendo maggiore potenza ai macchinari preposti al riciclaggio;
- aggiungendo acqua all'impasto.

La prima soluzione risulta essere anti-economica ed anti-ecologica quindi rimane molto più attuabile la seconda. Molti autori sostengono e concordano sul fatto che l'umidità del conglomerato riciclato debba aggirarsi intorno all'ottimo Proctor (umidità che consente, per una fissata energia, di ottenere la massima densità della miscela), ovviamente valori superiori del contenuto di liquidi del composto ne favoriscono la lavorabilità.

Come contro un eccesso di liquidi può limitarne l'addensabilità in quanto i liquidi che sono incompressibili, si opporrebbero all'azione compattante dei mezzi d'opera pregiudicando le proprietà meccaniche e la durata della miscela.

Un altro importante fattore che condiziona la lavorabilità e l'addensabilità è il tempo che intercorre tra la lavorazione dell'impasto, realizzata dalla fresatrice, ed il costipamento,

esercitato dai rulli. Questa attesa deve essere valutata con attenzione: tempi brevi tendono a generare l'effetto cuscino mentre tempi lunghi non consentono di addensare adeguatamente lo strato, in questo secondo caso l'emulsione è già nella fase di rottura e quindi sta legando il composto. Il cemento richiede un tempo prossimo alle 3-4 ore per iniziare la presa e poiché i rulli passano al massimo dopo un'ora dalla stesa non influisce sull'addensabilità del conglomerato; un effetto negativo è quello di generare un ambiente altamente basico ed accelerare ulteriormente la rottura dell'emulsione. Se la miscela venisse lavorata a distanza di tempo dal momento dell'accorpo del materiale legante potrebbe risultare difficile da lavorare se non impossibile. Nel riciclaggio in sito questa situazione non si verifica mai in quanto alla fresatura segue immediatamente l'addizione dei leganti, la miscelazione dell'impasto e la stesa.

5.3.1.5 CURVE DI ADDENSAMENTO

Di ogni campione, attraverso il software collegato alla pressa giratoria, è stata registrata l'altezza in funzione del numero di giri. Grazie a questi dati e in relazione alla geometria della fustella (diametro di 150 mm), è stato possibile calcolare il peso di volume di tutti i provini con la progressione della compattazione ed è riportato in ordinata nelle cosiddette *curve di addensamento*. La Tabella 5. 6 riporta, per alcuni provini, le altezze in funzione del numero di giri compiuti dalla fustella :

N° Giri	01A_OR_1.5C_5.0E	02A_OR_1.5C_5.0E	03A_OR_1.5C_5.0E
0	141,8	141,8	137,6
2	137,6	137,8	133,8
4	134,9	135,2	131,6
6	132,9	133,3	129,8
8	131,3	131,7	128,5
10	130,0	130,4	127,4
12	128,9	129,3	126,4
14	128,0	128,4	125,6
16	127,1	127,6	124,9
18	126,4	126,8	124,3
20	125,8	126,2	123,7
25	124,4	124,8	122,5
30	123,2	123,7	121,6
35	122,3	122,7	120,8
40	121,5	122,0	120,1
45	120,9	121,3	119,5
50	120,3	120,7	119,0
55	119,7	120,1	118,5
60	119,3	119,7	118,1
65	118,9	119,2	117,7
70	118,5	118,9	117,4
75	118,1	118,5	117,0
80	117,8	118,2	116,7
85	117,5	117,9	116,5
90	117,2	117,6	116,2
95	117,0	117,3	116,0
100	116,7	117,0	115,8
105	116,5	116,8	115,5
115	116,1	116,4	115,1

125	115,7	116,0	114,8
135	115,3	115,6	114,5
145	115,0	115,3	114,2
155	114,7	115,0	113,9
165	114,4	114,7	113,6
175	114,2	114,5	113,4
180	113,9	114,2	113,1

Tabella 5. 6: Variazione dell'altezza in relazione al numero di giri durante l'addensamento

Come lecito attendersi, le maggiori riduzioni di altezza si hanno entro i primi giri, poi, man mano che il volume dei vuoti diminuisce si ha la tendenza a raggiungere un asintoto in corrispondenza dell'altezza finale.

5.3.2 ANALISI DELLE PROPRIETÀ VOLUMETRICHE

5.3.2.1 PROVINI CON 3.5% DI EMULSIONE BITUMINOSA: CURVE DI ADDENSAMENTO

Nelle seguenti figure sono diagrammate le densità dei provini contenenti emulsione di bitume in tenore del 3.5%, in funzione del numero di giri che ha operato la pressa giratoria. La Figura 5. 18 e la Figura 5. 19, riassumono le miscele contenenti rispettivamente il 3.0% e l'1.5% di Cemento, con tenori variabili di Polverino compresi tra lo 0% e il 5%.

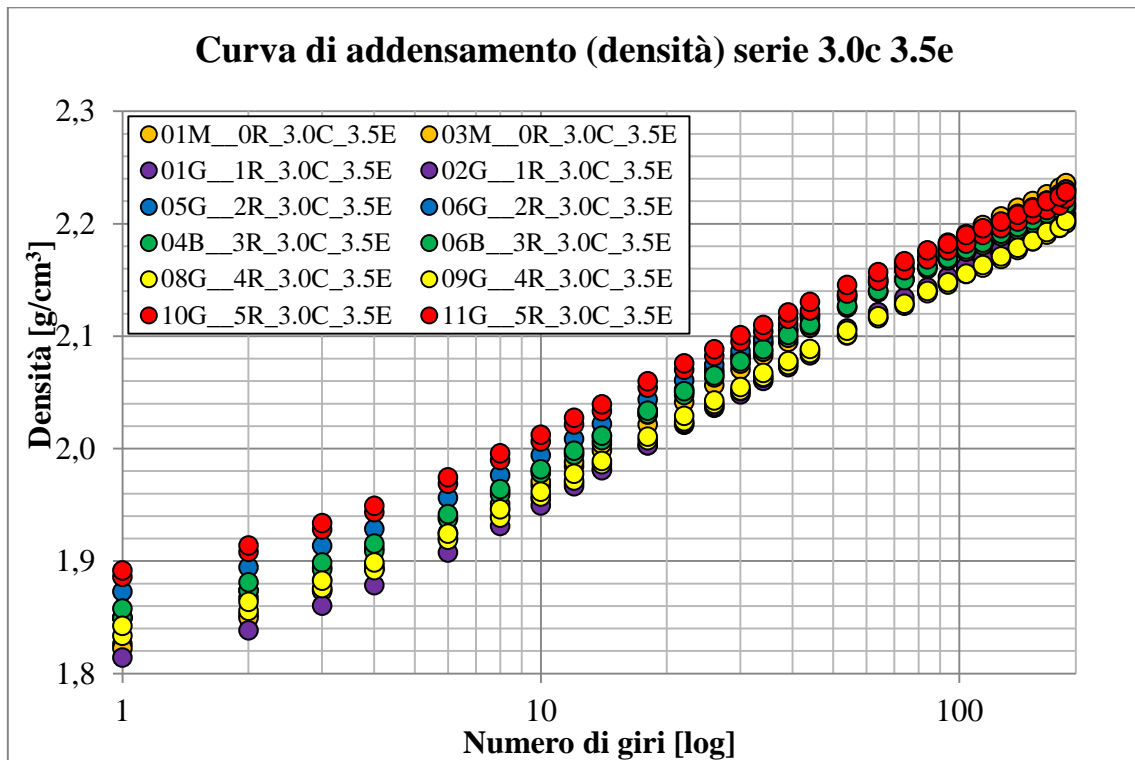


Figura 5. 18: curve di addensamento dei campioni con 3.5% di Emulsione, 3% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

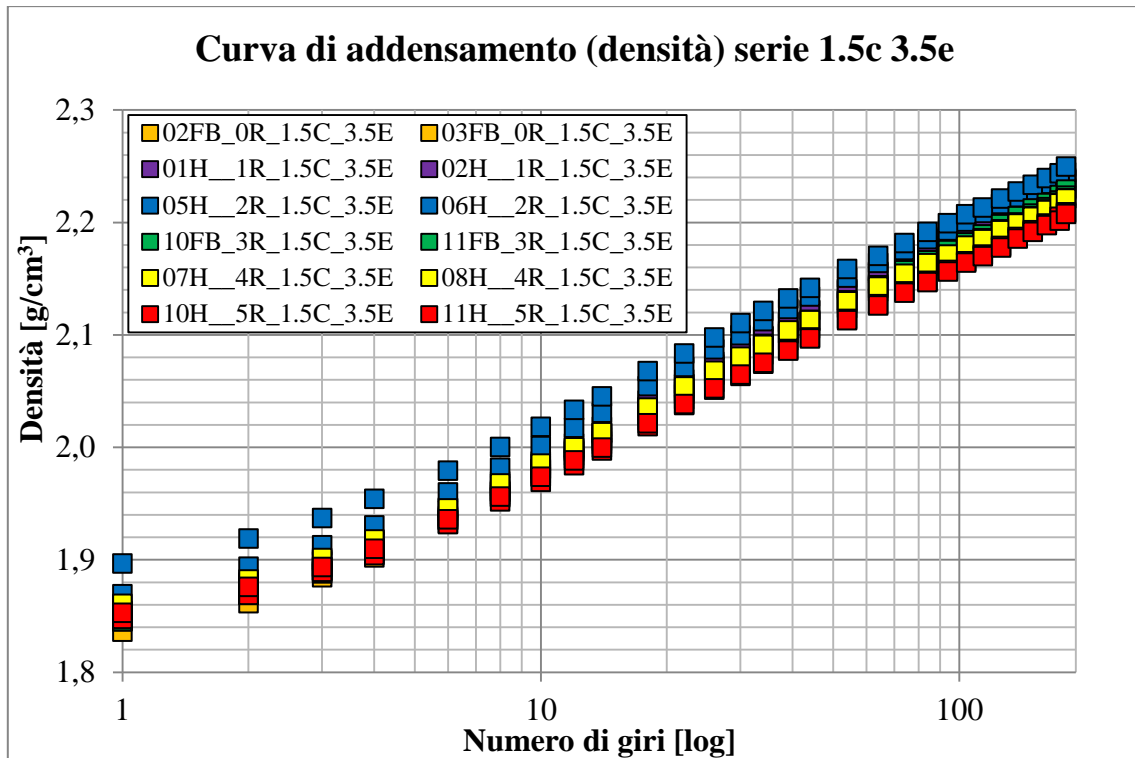


Figura 5. 19: curve di addensamento dei campioni con 3.5% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

Le densità raggiunte, assumono tutte valori intorno a 2.2 g/cm^3 ed è molto importante constatare che l'aggiunta di polverino di gomma alla miscela non comporta sostanziali differenze di addensabilità e lavorabilità delle miscele, che raggiungono tutte un adeguato grado di addensamento, in accordo con le caratteristiche delle miscele tradizionali per conglomerati bituminosi a freddo.

Le curve rappresentate sono infatti paragonabili sia in termini di ordinata di partenza che in termini di pendenza, rappresentativa appunto della lavorabilità, a conferma di quanto appena detto.

5.3.2.2 PROVINI CON 5.0% DI EMULSIONE BITUMINOSA: CURVE DI ADDENSAMENTO

Nelle seguenti figure sono diagrammate le densità dei provini contenenti emulsione di bitume in tenore del 5.0%, in funzione del numero di giri che ha operato la pressa giratoria. La Figura 5. 20 e la Figura 5. 21, riassumono le miscele contenenti rispettivamente il 3.0% e l'1.5% di Cemento, con tenori variabili di Polverino compresi tra lo 0% e il 5%.

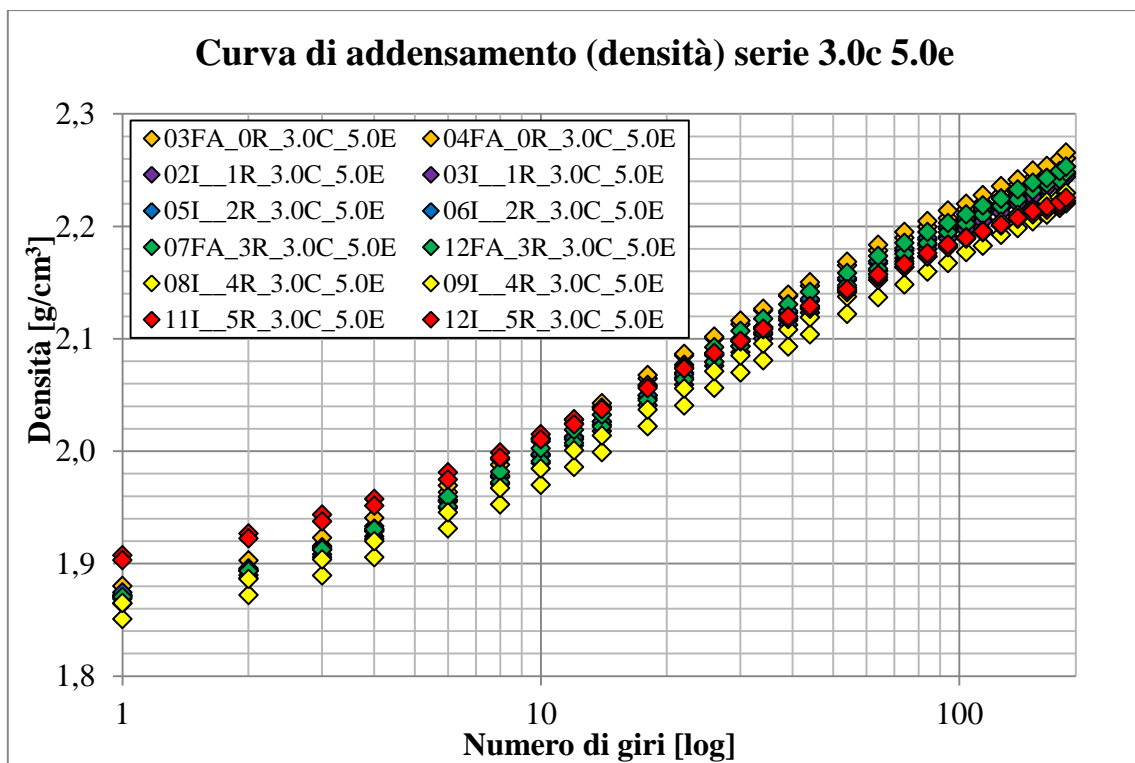


Figura 5. 20: curve di addensamento dei campioni con 5.0% di Emulsione, 3.0% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

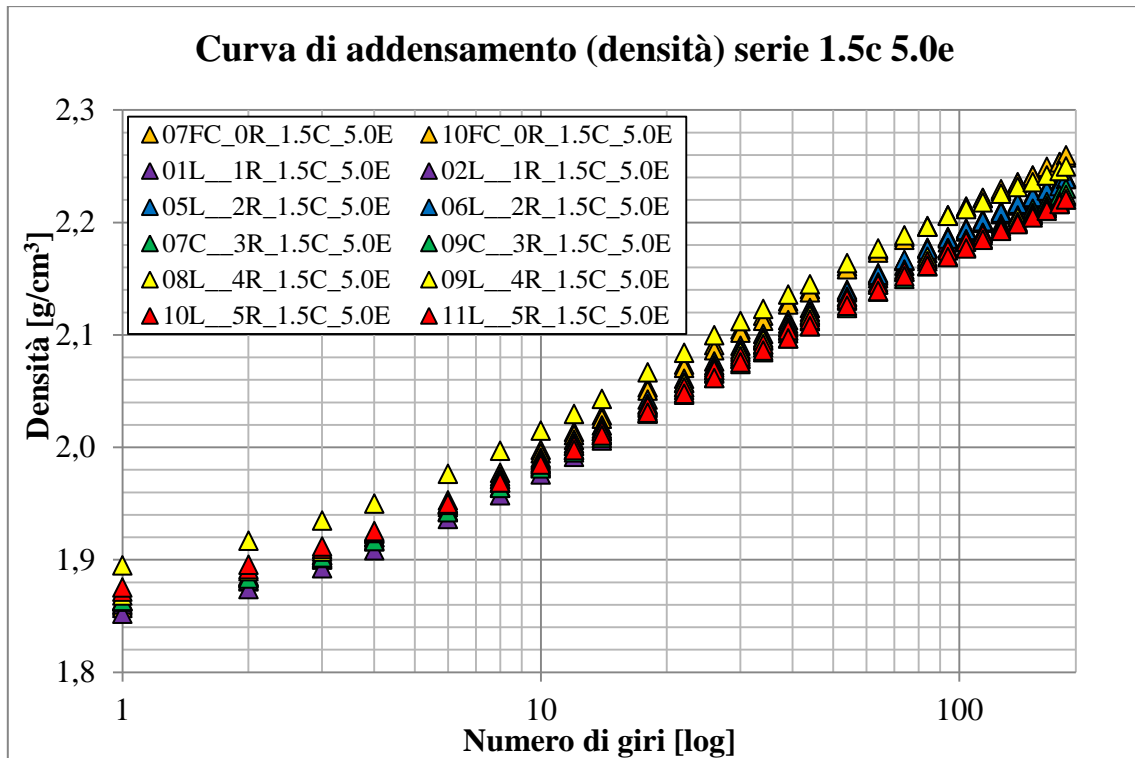


Figura 5. 21: curve di addensamento dei campioni con 5.0% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

Dall'analisi dei grafici, è evidente come, l'aggiunta di Cemento a parità di Emulsione, non comporti sostanziali differenze in termini di densità.

Analogamente anche l'aumento di Emulsione a parità di Cemento, non ha influenzato in modo apprezzabile la densità finale al termine della compattazione mentre sembrerebbe aver favorito l'addensamento nella fase iniziale della compattazione ovvero per bassi livelli di energia di compattazione.

5.3.2.3 VALUTAZIONE DELLE DENSITÀ MASSIME PER CIASCUNA MISCELA

Le curve di addensamento appena viste, esprimono la massima densità raggiunta da un campione realizzato mediante Pressa Giratoria, ma non tengono conto della massima densità raggiungibile dal campione stesso in funzione dei tenori di aggregati, leganti e delle loro rispettive densità.

La normativa UNI EN 12697-5 permette di determinare la massima densità di una miscela mediante procedura matematica, noti i pesi volume e le percentuali dei componenti che la costituiscono, attraverso la relazione:

$$\rho_{max} = \frac{100}{(p_{a1}/\rho_{a1}) + (p_{a2}/\rho_{a2}) + \dots + (p_b/\rho_b)}$$

- Dove: ρ_{max} = massima densità della miscela [Kg/m³]
- $p_{a1}, p_{a2} \dots$ = % di aggregati nella miscela
- $\rho_{a1}, \rho_{a2} \dots$ = densità apparente degli aggregati [Kg/m³]
- p_b = % di bitume nella miscela
- ρ_b = densità del bitume [Kg/m³]

Per ognuna delle 24 miscele analizzate, è stato possibile calcolare la massima densità ρ_{max} raggiungibile. I risultati ottenuti per la ρ_{max} sono riportati in tabella:

Densità massima miscele ρ_{max} [g/cm ³]						
Miscela \ CCR%	0	1	2	3	4	5
3.0 Cemento 3.5 E	2,525	2,511	2,497	2,482	2,468	2,454
1.5 Cemento 3.5 E	2,517	2,503	2,489	2,475	2,461	2,446
3.0 Cemento 5.0 E	2,492	2,478	2,464	2,450	2,436	2,422
1.5 Cemento 5.0 E	2,484	2,470	2,456	2,443	2,429	2,415

Tabella 5. 7: Valori di densità massima [g/cm³] per le 4 miscele e i 6 dosaggi di CCR

Questi dati possono essere riassunti graficamente, costruendo un grafico che riporta in ascissa i tenori di Polverino di Gomma e in ordinata i valori di densità massima indicata con ρ_{\max} o Gmm per ognuna delle 4 miscele studiate.

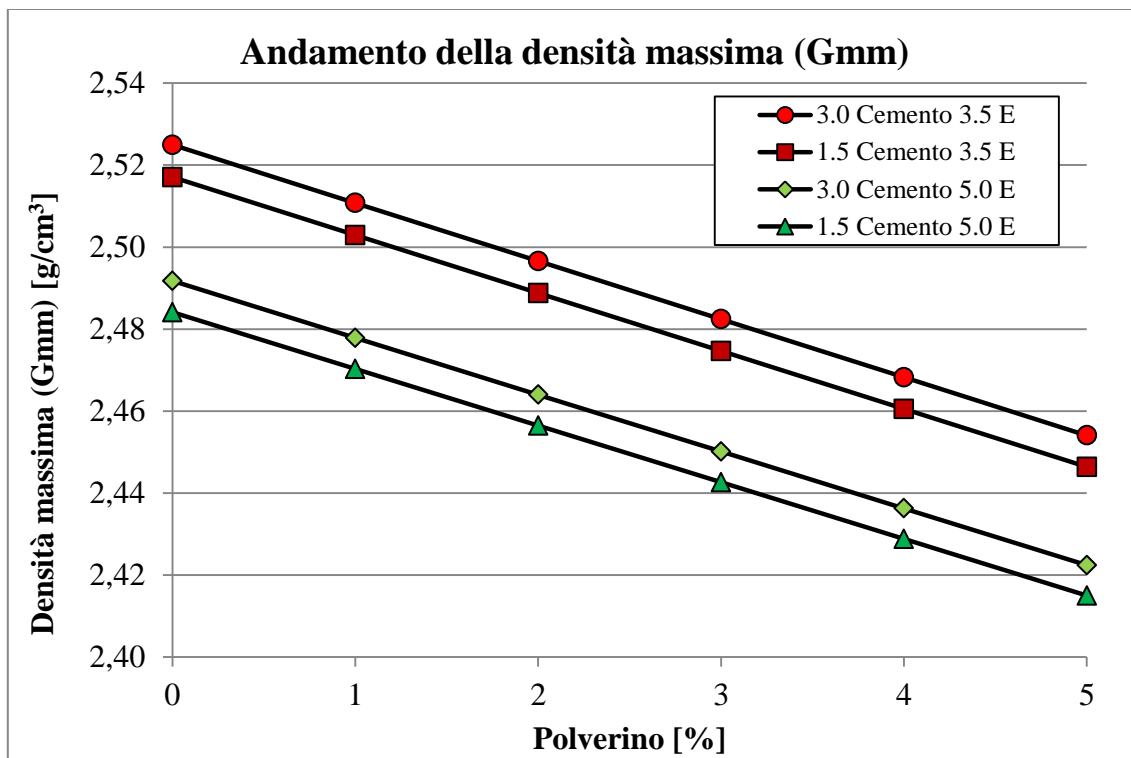


Figura 5. 22: andamento della massima densità (Gmm) per le diverse miscele all'aumentare del Polverino di Gomma

I calcoli necessari per la realizzazione delle curve riportate in Figura 5. 22, hanno tenuto conto delle seguenti densità per i singoli componenti della miscela:

Componente	Densità [g/cm3]
RAP 10 - 10+	2,621
RAP 5.0 - 10	2,626
RAP 0 – 5.0	2,530
Filler	2,700
Cemento	3,500
CCR	1,080
Bitume	1,000

Tabella 5. 8: Densità delle diverse componenti delle miscele

L'andamento lineare decrescente della densità massima delle miscele, è dovuto alla sostituzione della parte fine del RAP (0 - 5 mm) a parità di volume, con percentuali crescenti linearmente di Rubber.

Il salto evidenziato dalle curve con lo stesso tenore di Emulsione Bituminosa, è causato dalla diversa densità del Filler e del Cemento, ovviamente essendo il peso volume del primo inferiore rispetto al secondo, anche la densità massima della miscela a parità di % complessiva Filler + Cemento risulterà più bassa.

Infine anche l'aumento della % di Emulsione Bituminosa e quindi di Bitume nella miscela come per il Filler, comporterà una diminuzione della massima densità ottenibile.

5.3.2.4 PROVINI CON 3.5% DI EMULSIONE BITUMINOSA: CURVE DI ADDENSAMENTO (GMM %)

Nelle seguenti figure sono diagrammati i gradi di addensamento G_{mm} % dei provini contenenti emulsione di bitume in tenore del 3.5%, in funzione del numero di giri che ha operato la pressa giratoria. Per grado di addensamento G_{mm} %, si intende il rapporto tra e la densità massima raggiungibile dalla singola miscela (Tabella 5. 7) espressa in percentuale. La Figura 5. 23 e la Figura 5. 24 riassumono le miscele contenenti rispettivamente il 3.0% e l'1.5% di Cemento, con tenori variabili di Polverino compresi tra lo 0% e il 5%.

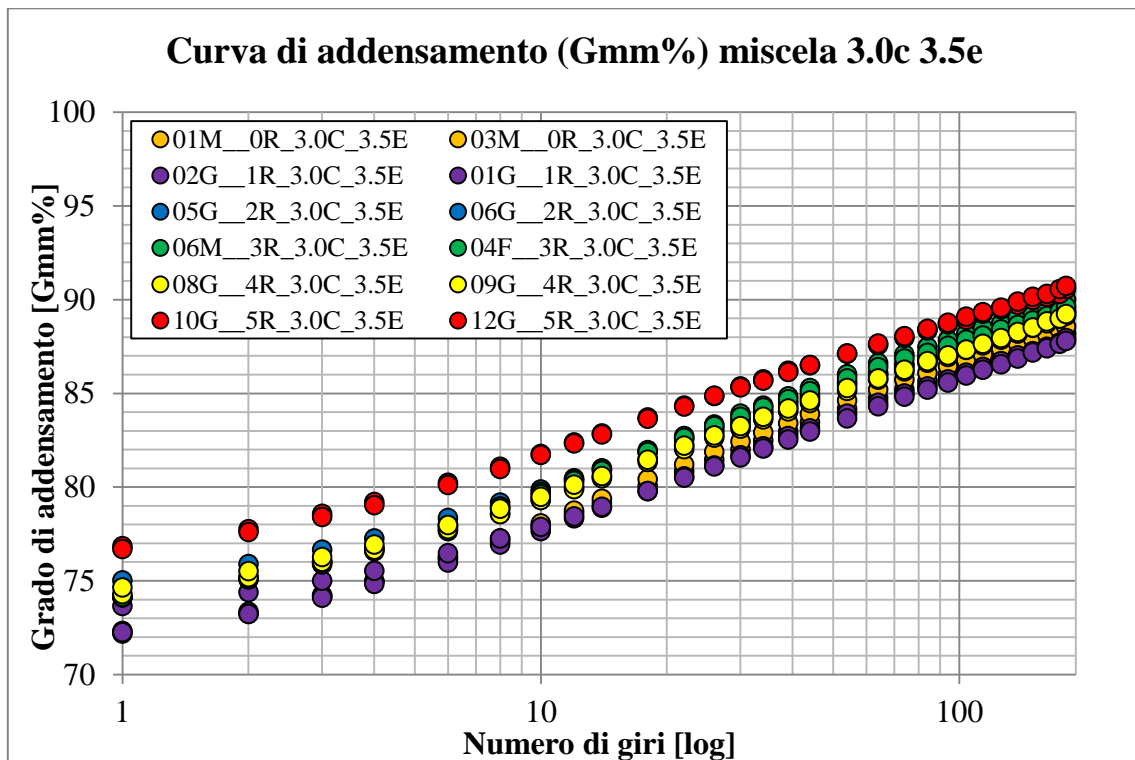


Figura 5. 23: Curve di addensamento (Gmm %) dei campioni con 3.5% di Emulsione, 3.0% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

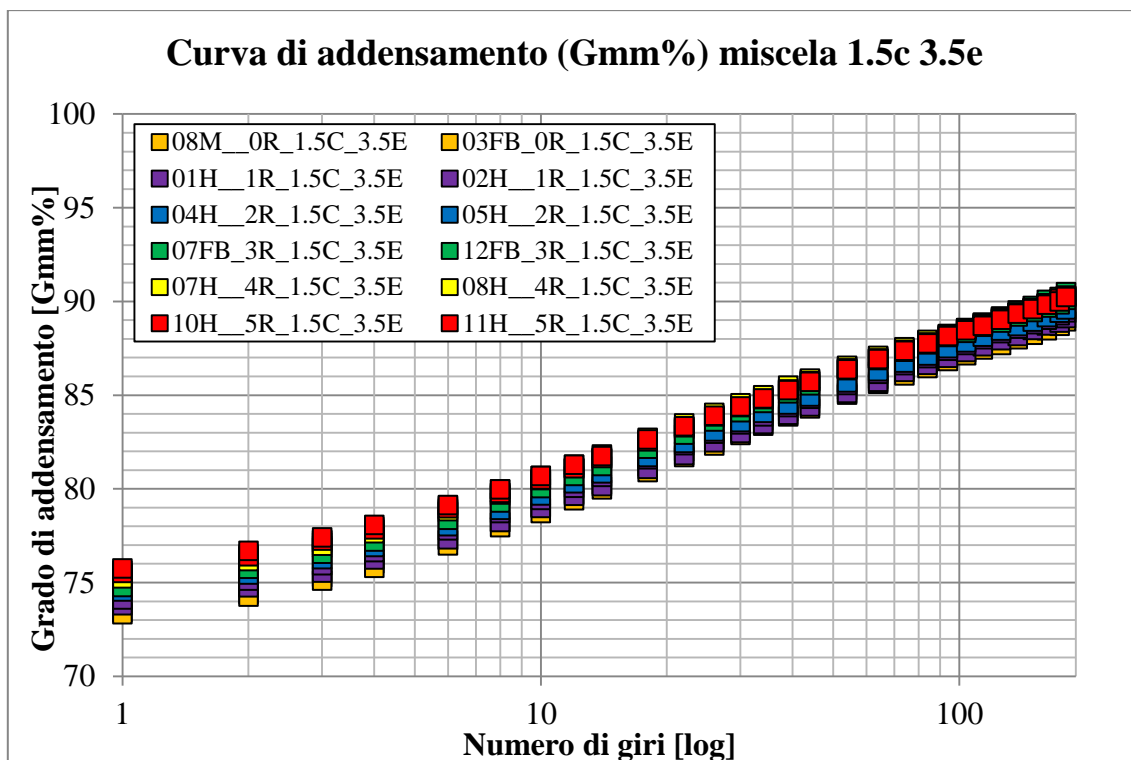


Figura 5. 24: Curve di addensamento (Gmm %) dei campioni con 3.5% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

I grafici mostrano che ad un incremento di CCR corrisponde una maggior facilità di auto addensamento della miscela e il raggiungimento di valori di addensamento maggiori.

Si fa notare che tale aspetto non era rilevabile dai grafici di densità ai paragrafi 5.3.2.1 e 5.3.2.2 in quanto, all'aumentare del polverino di gomma, corrispondeva una diminuzione della densità in termini assoluti, ma se confrontata con la densità massima della miscela, è evidente come i campioni con maggior tenore di CCR raggiungano addensamenti maggiori.

Un aspetto non trascurabile che verrà descritto in seguito, è il problema del recupero elastico delle miscele che subiscono un rigonfiamento tanto maggiore quanto più è alto il tenore di Rubber.

5.3.2.5 PROVINI CON 5.0% DI EMULSIONE BITUMINOSA: CURVE DI ADDENSAMENTO (GMM %)

Nelle seguenti figure sono diagrammati i gradi di addensamento G_{mm} % dei provini contenenti emulsione di bitume in tenore del 5.0%, in funzione del numero di giri che ha operato la pressa giratoria. La Figura 5. 25 e la Figura 5. 26 riassumono le miscele contenenti rispettivamente il 3.0% e l'1.5% di Cemento, con tenori variabili di Polverino compresi tra lo 0% e il 5%.

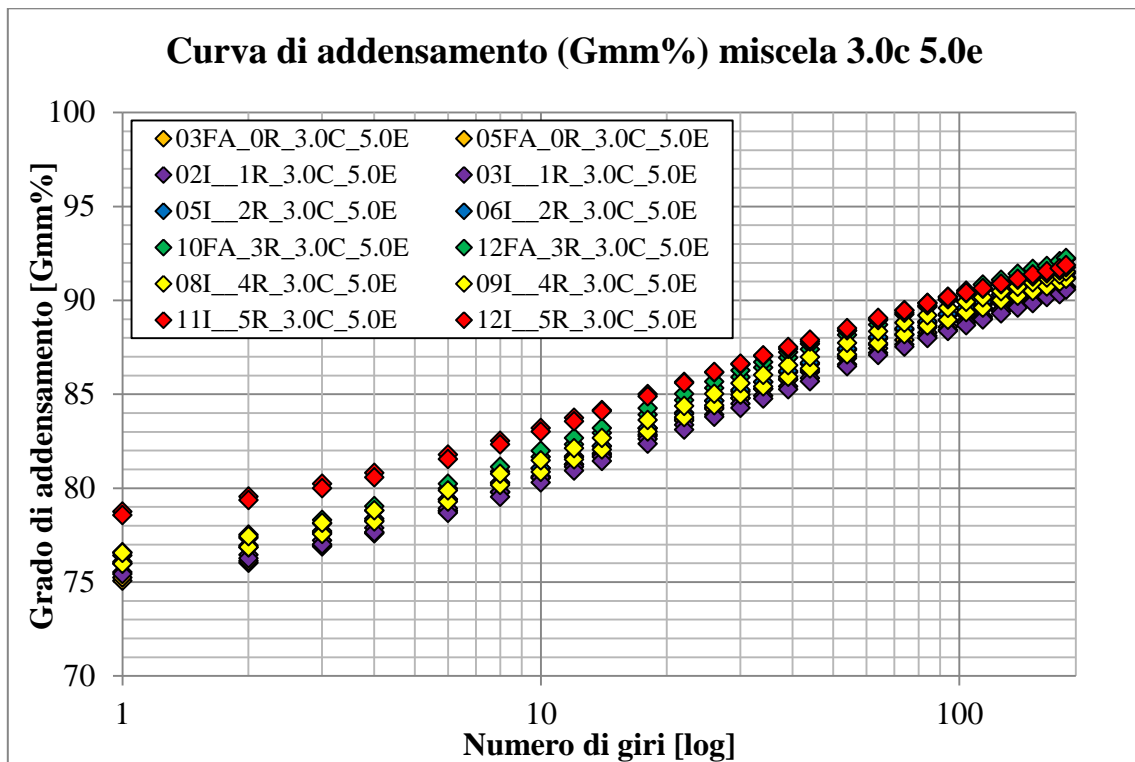


Figura 5. 25:: curve di addensamento (Gmm) dei campioni con 5.0% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

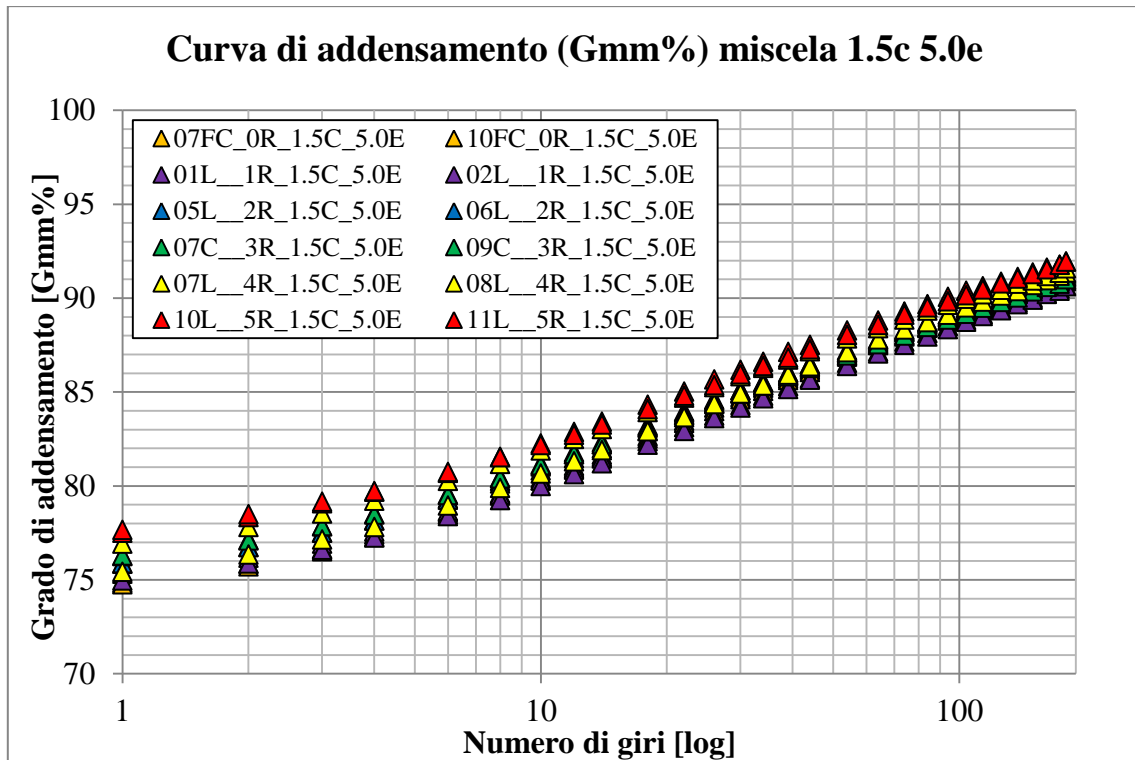


Figura 5. 26: curve di addensamento (Gmm) dei campioni con 5.0% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

Analogamente a quanto visto nel paragrafo precedente, anche in questo caso all'aumentare del Polverino di Gomma, cresce il grado di Addensamento ($G_{mm}\%$).

Dal confronto dei grafici, si può notare come a parità di Cemento, l'aumento di Emulsione, contribuisca alla lavorabilità della miscela che si traduce in un maggior grado di addensamento e una minore dispersione tra le curve delle diverse miscele.

5.3.2.6 VARIAZIONE DEL GRADO DI ADDENSAMENTO IN SEGUITO ALLA MATURAZIONE

Come introdotto in precedenza, un aspetto da non sottovalutare è il rigonfiamento che subiscono i provini in seguito alla maturazione.

Considerando 2 momenti della maturazione ovvero $t = 0$ (al termine della compattazione) e $t = 3$ gg. (dopo la prima maturazione in stufa), è stato possibile valutare il grado di addensamento Gmm% nei due istanti e quindi la perdita di addensamento Δ Gmm % in seguito alla maturazione.

Nei seguenti grafici si riporta il grado di addensamento Gmm% al tempo $t = 0$ e al temp $t = 3$ gg., indicandolo rispettivamente con Gmm% Gir e Gmm% mis sull'asse delle Y, e le diverse % di CCR sull'asse delle X, inoltre si è costruita una retta che rappresenta l'andamento del gap tra i due gradi di addensamento Δ Gmm%.

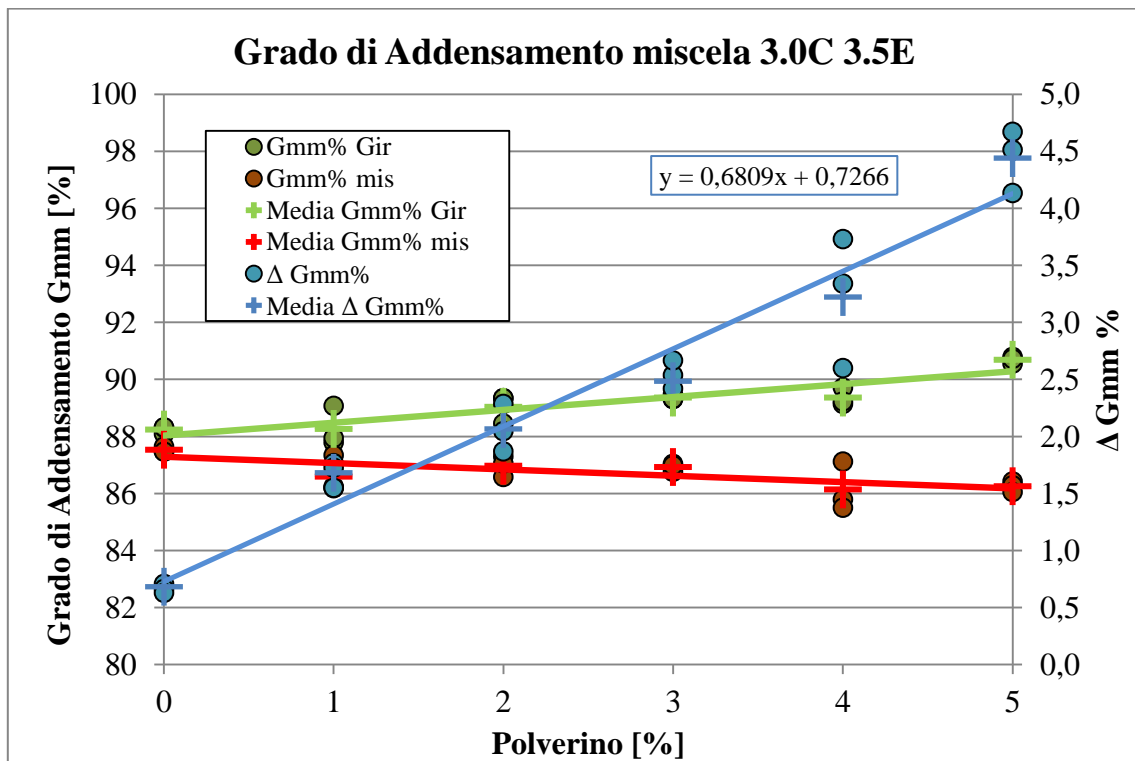


Figura 5. 27: Variazione del Grado di Addensamento Gmm% in seguito a maturazione, dei campioni con 3.5% di Emulsione, 3.0% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

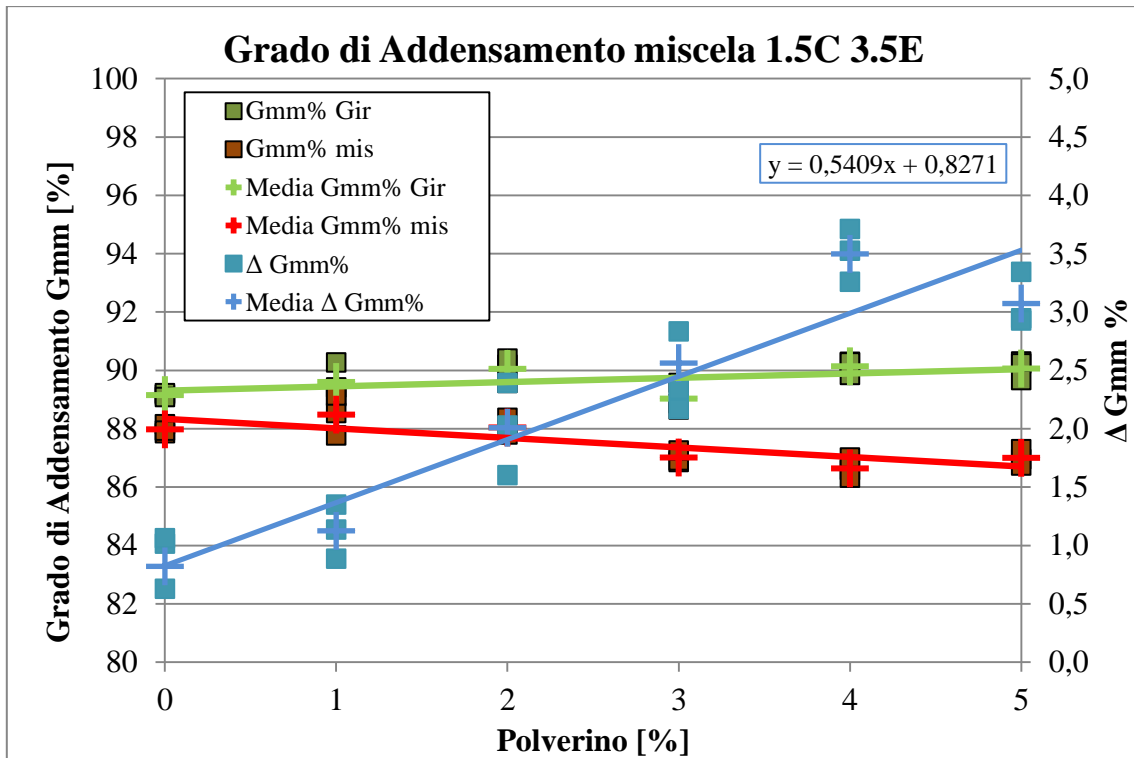


Figura 5. 28: Variazione del Grado di Addensamento in seguito a maturazione, dei campioni con 3.5% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

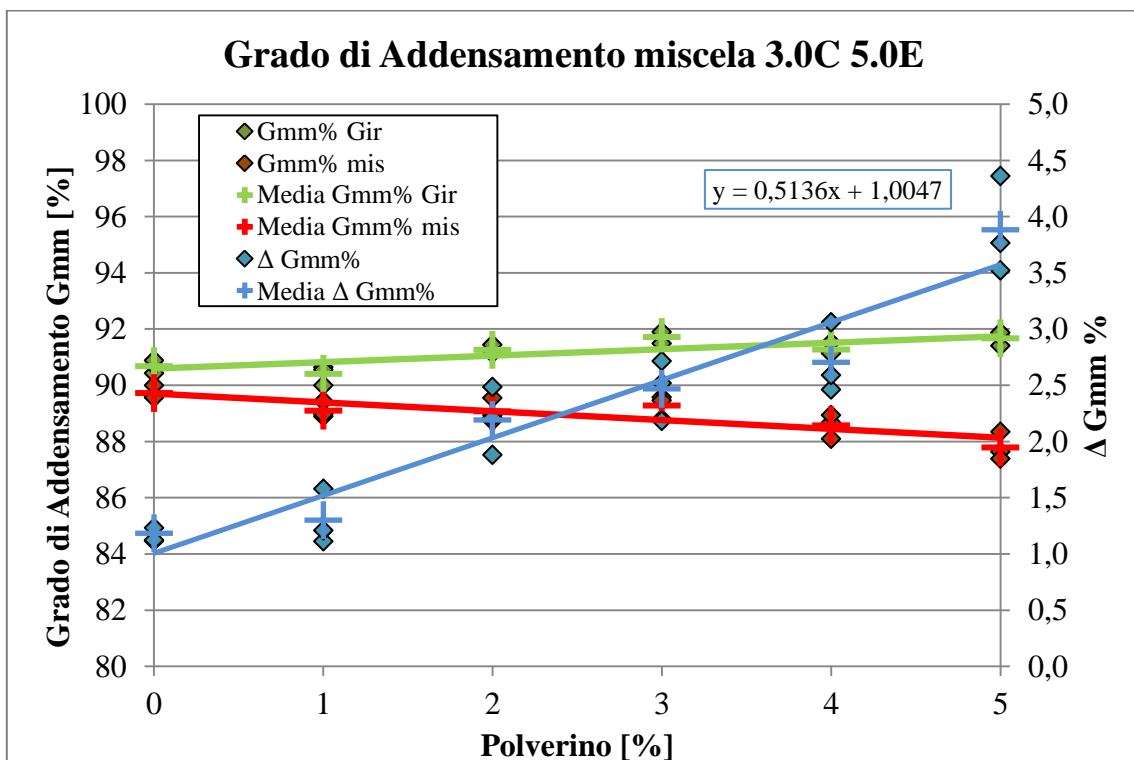


Figura 5. 29: Variazione del Grado di Addensamento in seguito a maturazione, dei campioni con 5.0% di Emulsione, 3.0% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

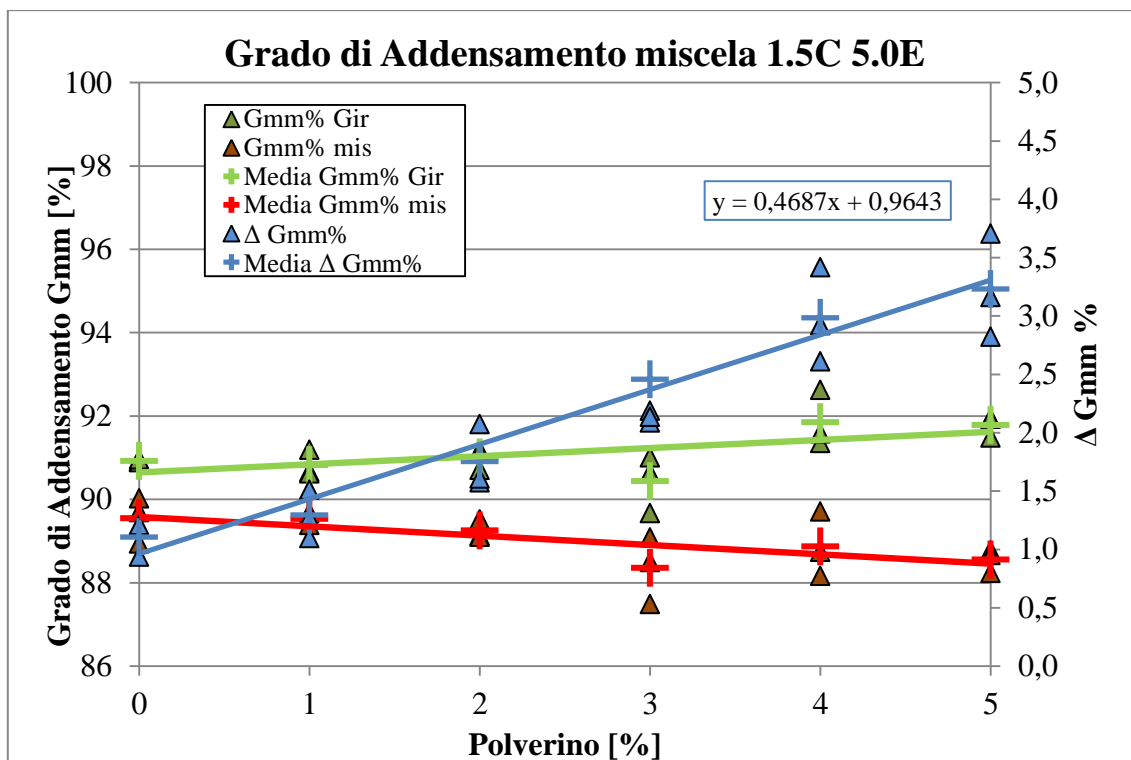


Figura 5. 30: variazione del Grado di Addensamento in seguito a maturazione, dei campioni con 5.0% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

Analizzando le curve relative all'addensamento per $t = 0$ gg. (linee verdi), l'effetto del polverino di gomma sembrerebbe incrementare il Gmm%. Ma analizzando poi le curve per $t = 3$ gg. (linee rosse), si capisce subito come l'aumento iniziale di addensamento, venga perso durante la maturazione ottenendo valori più bassi di quelli senza CCR.

La differenza di Gmm% in seguito alla maturazione, è in parte dovuta all'emulsione e in parte dovuta al polverino di gomma. Queste due componenti rendono il materiale più elastico e quindi inducono un recupero delle deformazioni subite durante l'addensamento con pressa giratoria in seguito alla maturazione.

L'effetto imputabile alla sola emulsione, è evidente per provini nei quali non si ha CCR, nelle miscele con un maggior quantitativo di emulsione, la perdita di Gmm% è valutabile attorno all'1% mentre per le miscele povere di emulsione si riduce allo 0.6%.

Per poter effettuare un confronto tra le diverse miscele, vengono ora riportate solamente le linee del $\Delta Gmm\%$:

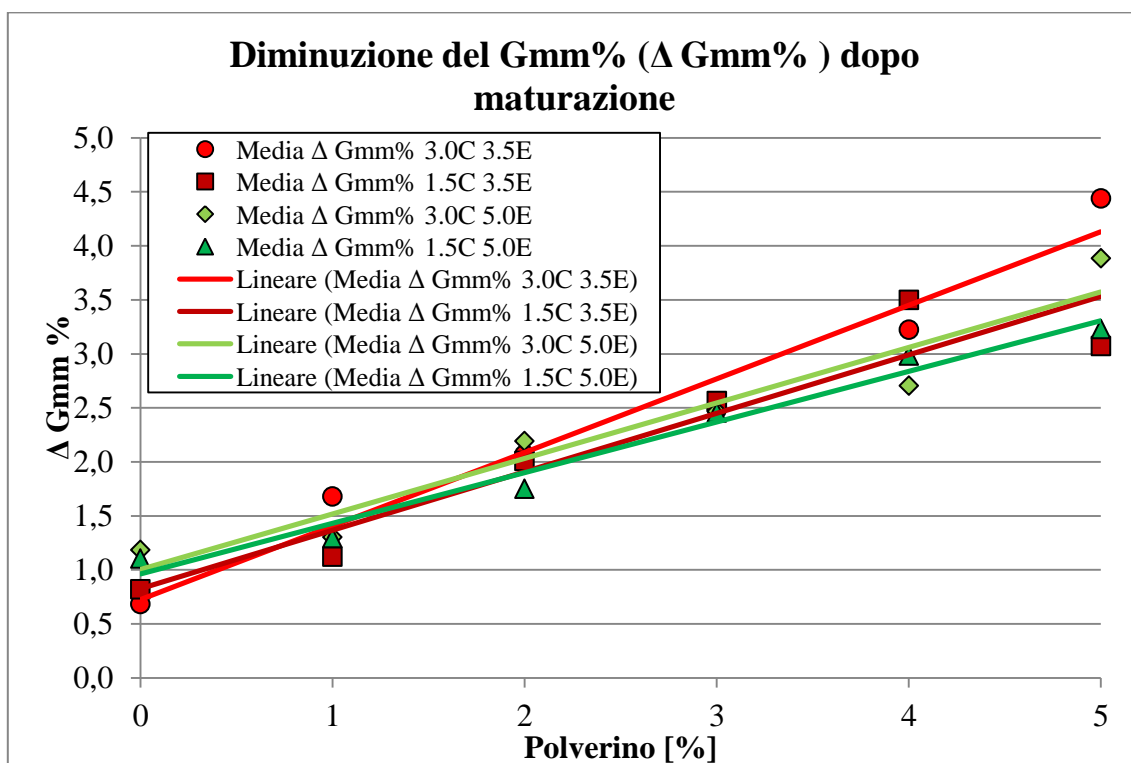


Figura 5. 31: Diminuzione $\Delta Gmm\%$ delle diverse miscele in seguito a maturazione

La maggiore differenza di addensamento si verifica nei campioni che contengono la quantità di Polverino di gomma più elevata, a dimostrazione che anche il CCR contribuisce ad una diminuzione di Gmm%. Per questi ultimi infatti si ha una perdita in termini di Grado di Addensamento, pari a circa 3.0 % - 4.0% contro lo 0.5% - 1% di differenza, che si misura in assenza di Polverino di Gomma.

Aumentando il dosaggio di cemento, si ha un aumento della perdita di addensamento per provini con CCR al 5%, sia per miscele con 3.5% di emulsione che in quelle con li 5%. La riduzione di addensamento imputabile al cemento, si attenua per bassi valori di Polverino fino a diventare trascurabile nelle miscele che non lo contengono. Per miscele con 5% di emulsione infatti il valore di $\Delta Gmm\%$ è stato valutato pari all'1% sia per le miscele contenenti 1.5% di cemento che quelle con il 3%, analogamente per quelle

con il 3.5% di emulsione è stato calcolato un valore di $\Delta G_{mm}\%$ pari a 0.7%. Ancora una volta questo fenomeno evidenzia la cattiva attitudine del Cemento a lavorare con il Polverino di Gomma.

L'Emulsione, ha un duplice effetto sulle miscele: nelle miscele senza polverino, l'incremento di Emulsione a parità di Cemento, incrementa il recupero elastico che si manifesta con un $\Delta G_{mm}\%$ maggiore; all'aumentare della percentuale di CCR, in particolare per le miscele con il 5% di CCR, l'aggiunta di Emulsione tende invece a ridurre il $\Delta G_{mm}\%$, andamento evidenziato dalla pendenza delle linee di tendenza. Il significato fisico di questo fenomeno deriva dal fatto che, in assenza di CCR, sia l'emulsione a fornire la componente elastica alla miscela e quindi ad un incremento di Emulsione corrisponde un aumento del $\Delta G_{mm}\%$, mentre con il 5% di CCR, la componente elastica del materiale deriva principalmente dal Polverino mentre l'Emulsione che ben si lega al CCR, ne riduce l'effetto elastico.

5.3.3 OSSERVAZIONI

L'analisi preliminare rappresenta un momento determinante e particolarmente delicato di una sperimentazione. La scelta dei materiali, della granulometria, della quantità di acqua e cemento avrà un peso rilevante su tutto lo studio.

La miscela di inerti utilizzata è costituita dal 100% di fresato (o RAP) e la relativa curva granulometrica, risultato della scelta delle pezzature degli aggregati, è stata definita in riferimento alle norme tecniche CNR.

La prossima fase del presente studio persegue l'obiettivo di valutare l'influenza reciproca del tenore di cemento, del tenore di emulsione e del tenore di polverino di gomma sulla resistenza dei materiali, realizzando prove di trazione indiretta.

5.4 FASE 3: TEST DI RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA

5.4.1 DESCRIZIONE DEL TEST - ITS

5.4.1.1 INTRODUZIONE ED OBIETTIVI

Le prove di trazione indiretta si sono svolte al termine della maturazione descritta al paragrafo 0.

L'obiettivo dei test di trazione indiretta, è duplice: da un lato valutare se la presa e l'indurimento del cemento, principale responsabile della resistenza a trazione indiretta, siano condizionati dalla presenza dell'emulsione bituminosa e come quest'ultima incida su tale proprietà meccanica, dall'altro valutare l'influenza della aggiunta del CCR alle miscele e le eventuali modifiche apportate rispetto alle miscele di stampo tradizionale, senza polverino.

5.4.1.2 LA TRAZIONE INDIRECTA

Si definisce resistenza a trazione indiretta ITS, la massima tensione di trazione (calcolata) applicata a un provino cilindrico caricato diametralmente fino a rottura alla temperatura di prova e alla velocità di avanzamento della macchina.

Le modalità di prova, sono riportate nella norma UNI EN 12697-23.

La prova di resistenza a trazione indiretta può essere eseguita ad una temperatura compresa tra i 5 ed i 25°C; essa consente di stabilire dei criteri di qualità ed accettabilità delle miscele, sia in fase di studio degli impasti, che di comportamento in opera. In questa indagine, e di norma, la prova è condotta alla temperatura di 25°C.

I singoli campioni, dopo stoccaggio per 5h in cella climatica a 25°C, vengono sistemati opportunamente centrati tra i coltelli della pressa. Il posizionamento è eseguito in modo che l'asse dei provini risulti orizzontale, l'asse del coltello di carico superiore sia perfettamente parallelo a quello del coltello inferiore ed entrambi siano contenuti nel piano verticale passante per l'asse del provino.

Per agevolare la procedura di posizionamento, i coltelli di carico sono realizzati con una superficie concava di raggio di curvatura corrispondente al raggio nominale del provino.

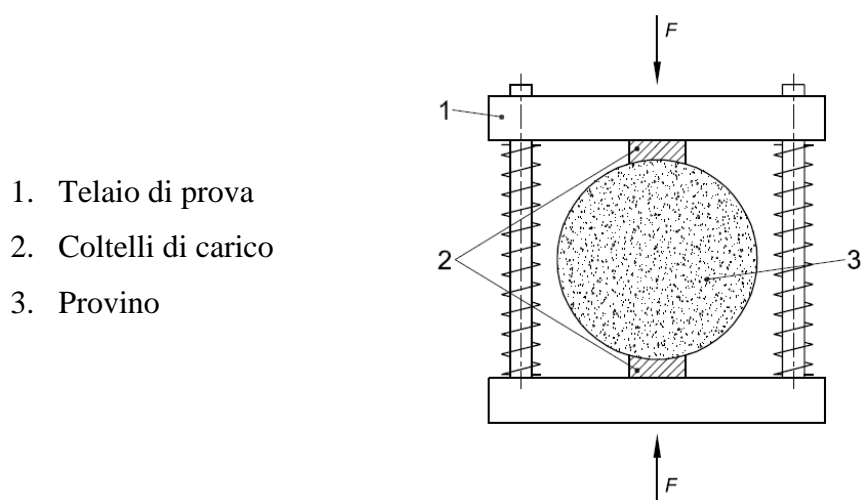


Figura 5. 32: Schema di carico della testina di prova per ITS

Nel rispetto della normativa viene applicato un carico impostando una velocità di avanzamento della pressa costante fino al raggiungimento della rottura del provino.

Noto il carico di rottura o carico di compressione massimo misurato durante la prova, il valore della tensione di rottura a trazione indiretta si determina con la seguente relazione:

$$\sigma_T = \frac{2 * P}{\pi * d * h}$$

Dove:

- σ_T è la resistenza o tensione di rottura a trazione indiretta (kg/cm²)
- P è il massimo carico assiale di compressione registrato (daN o Kg)
- D è il diametro del campione (cm)
- H è l'altezza del campione o spessore (cm)

Nel seguente studio, per la determinazione della σ_T è stata adottata una pressa statica computerizzata da 100 kN Galdabini (figura 5.9) configurata con tutti i dispositivi necessari per l'esecuzione della prova brasiliana.

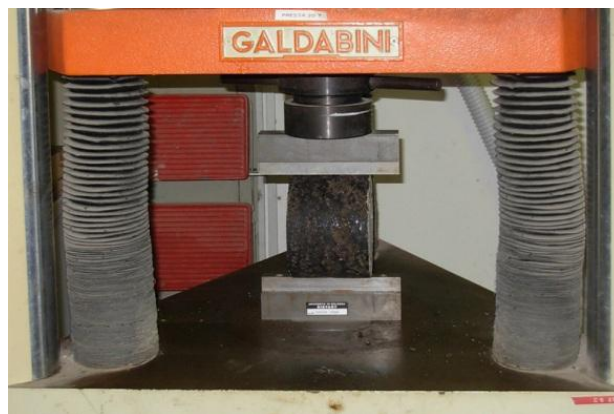


Figura 5. 33: Prove a trazione Indiretta con la pressa Galdabini

Dai grafici risultanti delle prove si potrà facilmente individuare il punto di rottura e con esso il carico, infatti la curva in essi rappresentata è caratterizzata da una fase crescente in cui il provino si deforma ed arriva a rottura e una seconda fase decrescente in cui il provino mostra comunque delle risorse di resistenza residue.

5.4.2 TEST ITS: CURVE DI CARICO E DEFORMAZIONE

Durante la prova, la macchina registra con una frequenza di 20 Hz i valori di carico (kN) applicato e la deformazione corrispondente del provino. I risultati vengono poi salvati su supporto removibile per poter essere elaborati e graficati per studiare il comportamento dei provini.

In questo paragrafo sono riportati a titolo informativo i grafici costruiti sui dati “grezzi” memorizzati dall’apparecchiatura di prova ovvero grafici Forza - Deformazione.

L’analisi dell’effetto delle diverse componenti: emulsione bituminosa, cemento e polverino di gomma, verrà affrontata nel paragrafo successivo.

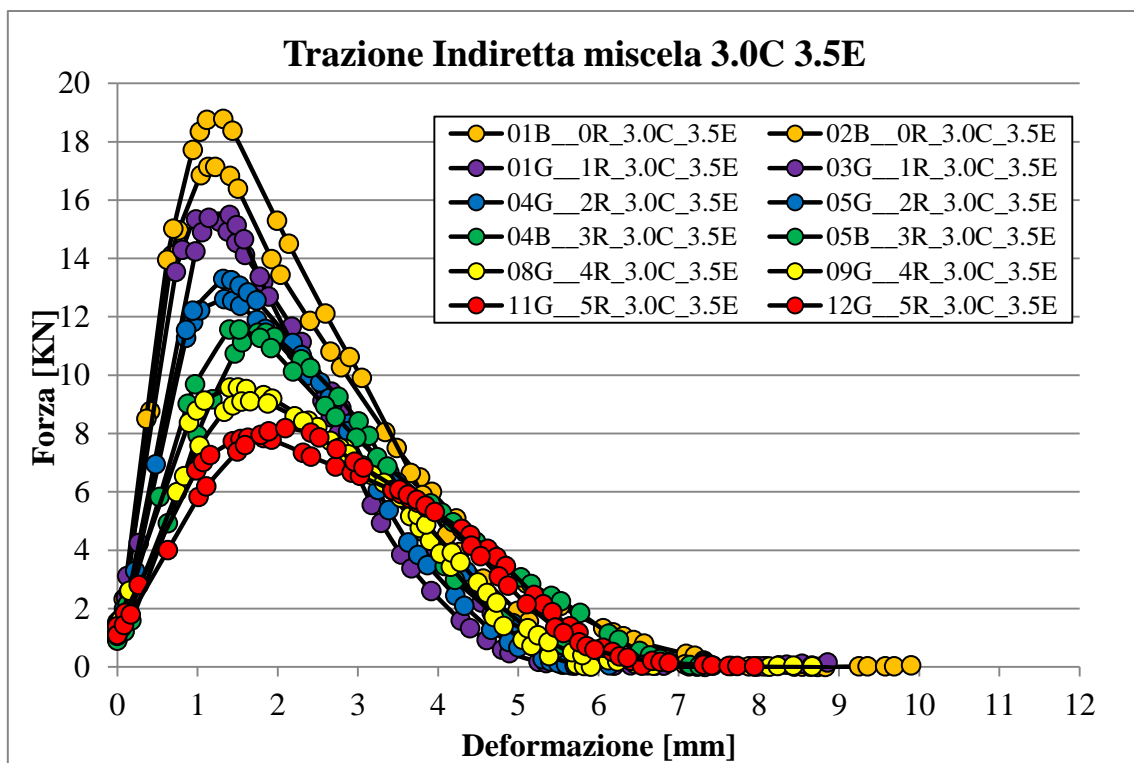


Figura 5. 34: ITS – Curva Carico - Deformazione dei campioni con 3.5% di Emulsione, 3.0% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

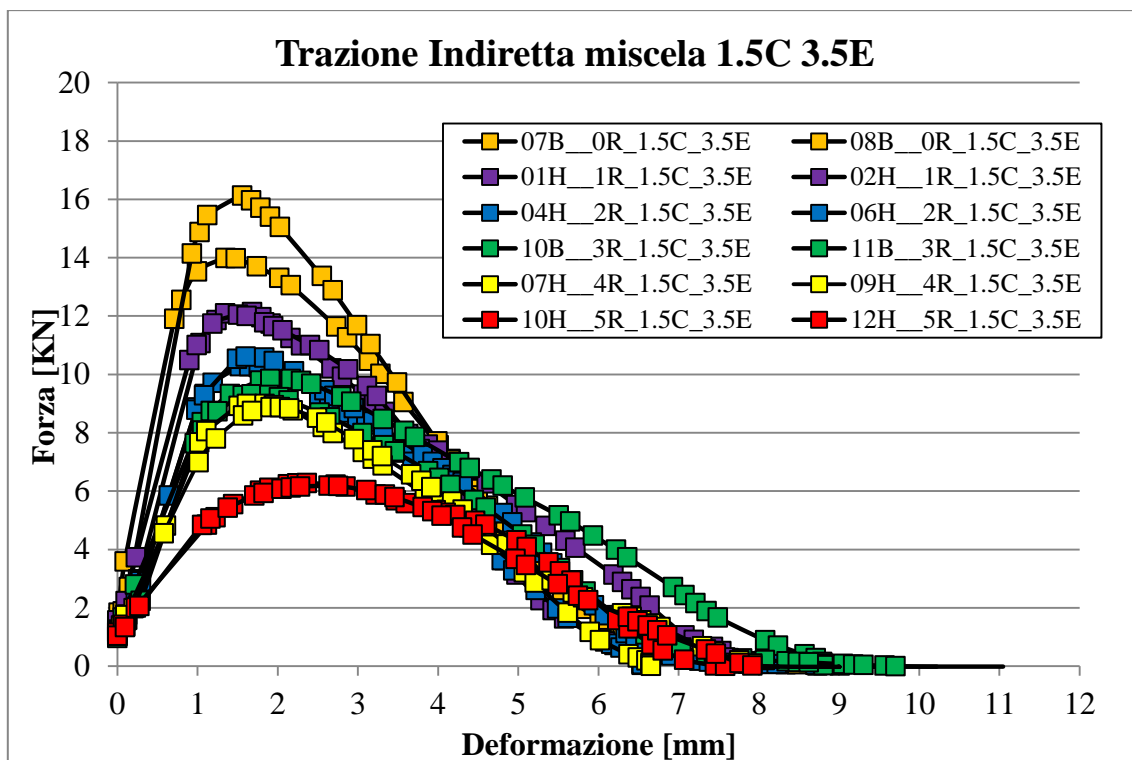


Figura 5. 35: ITS – Curva Carico - Deformazione dei campioni con 3.5% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

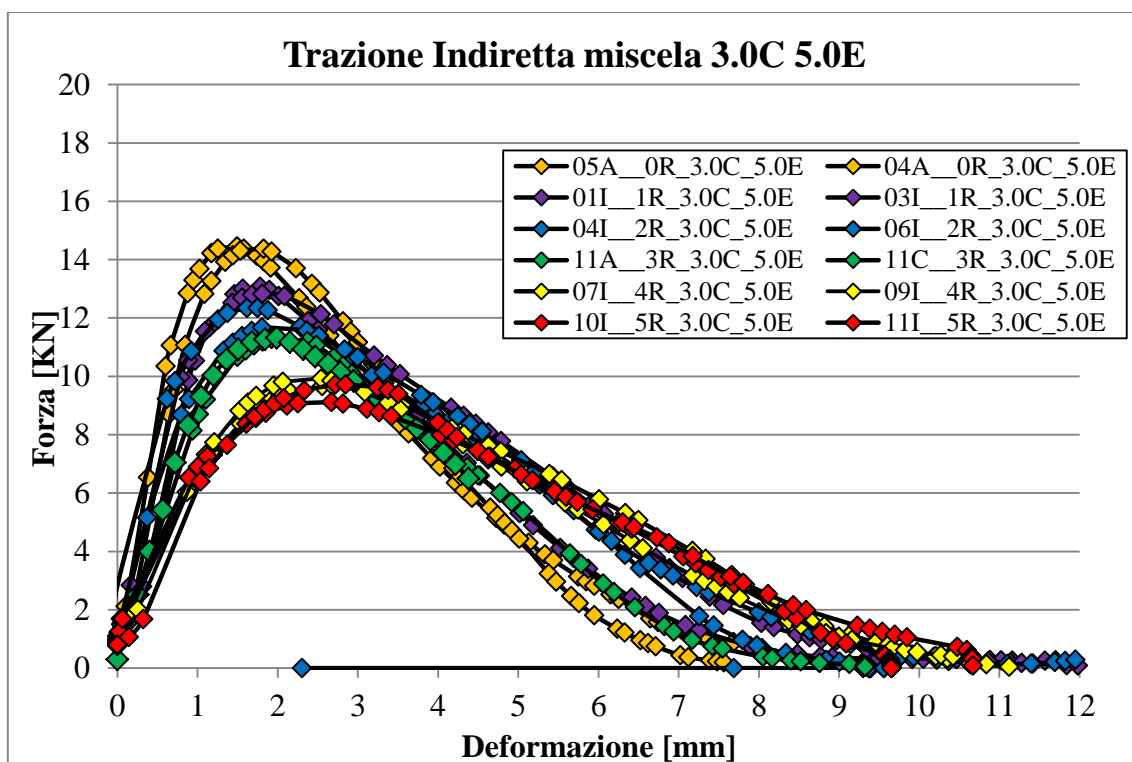


Figura 5. 36: ITS – Curva Carico - Deformazione dei campioni con 5.0% di Emulsione, 3.0% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

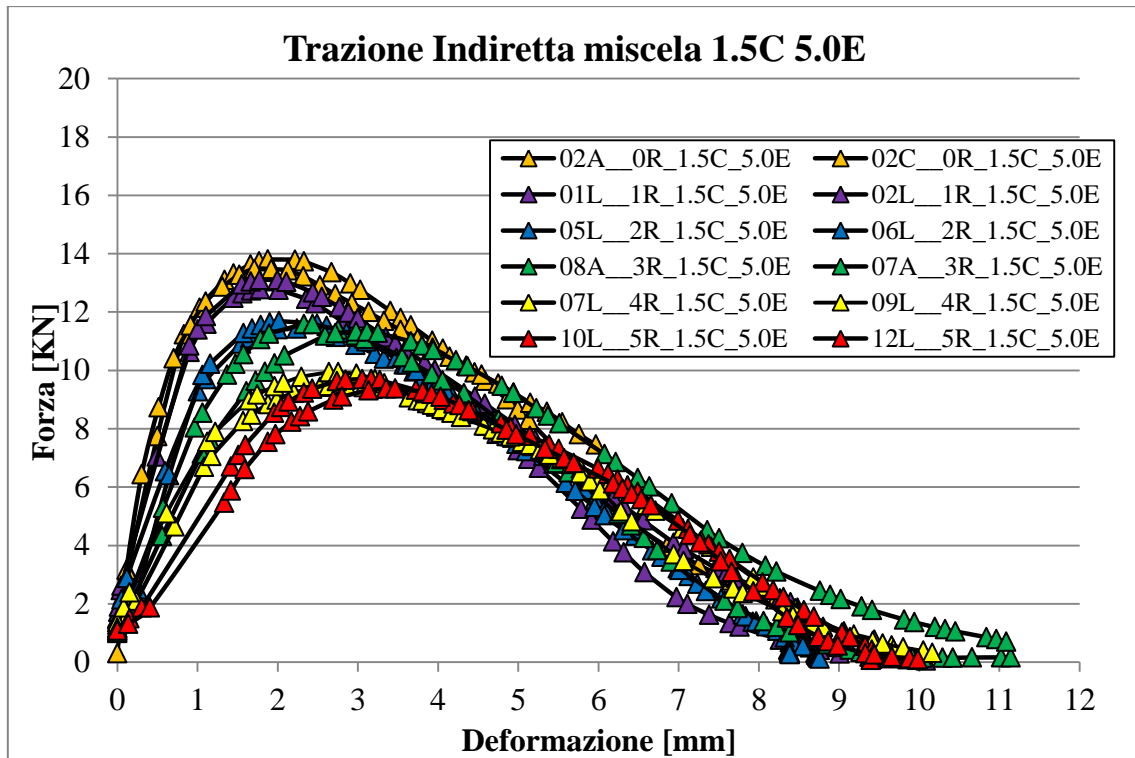


Figura 5. 37: ITS – Curva Carico - Deformazione dei campioni con 5.0% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

5.4.3 TEST ITS: CURVE TENSIONE E DEFORMAZIONE

Da un punto di vista ingegneristico, è più interessante conoscere e analizzare le tensioni che si sviluppano all'interno del provino. I grafici Carico – Deformazione, non considerano le caratteristiche geometriche proprie di ciascun provino.

Per questo motivo essendo noti per ciascun campione di prova, l'altezza e il diametro, è stato possibile ricavare a partire dai grafici in Figura 5. 34, Figura 5. 35, Figura 5. 36 e Figura 5. 37 i grafici Tensione – Deformazione successivi. Per il calcolo delle tensioni σ_T è stata utilizzata la relazione introdotta al paragrafo 5.4.1.2.

Il primo aspetto analizzabile sia nei grafici Carico – Deformazione che in quelli Tensione – Deformazione, è che l'aggiunta di CCR influenza il valore di Carico e di ITS (tensioni massime a rottura) negativamente, più alto è il tenore di Polverino, più bassa è la tensione a rottura massima.

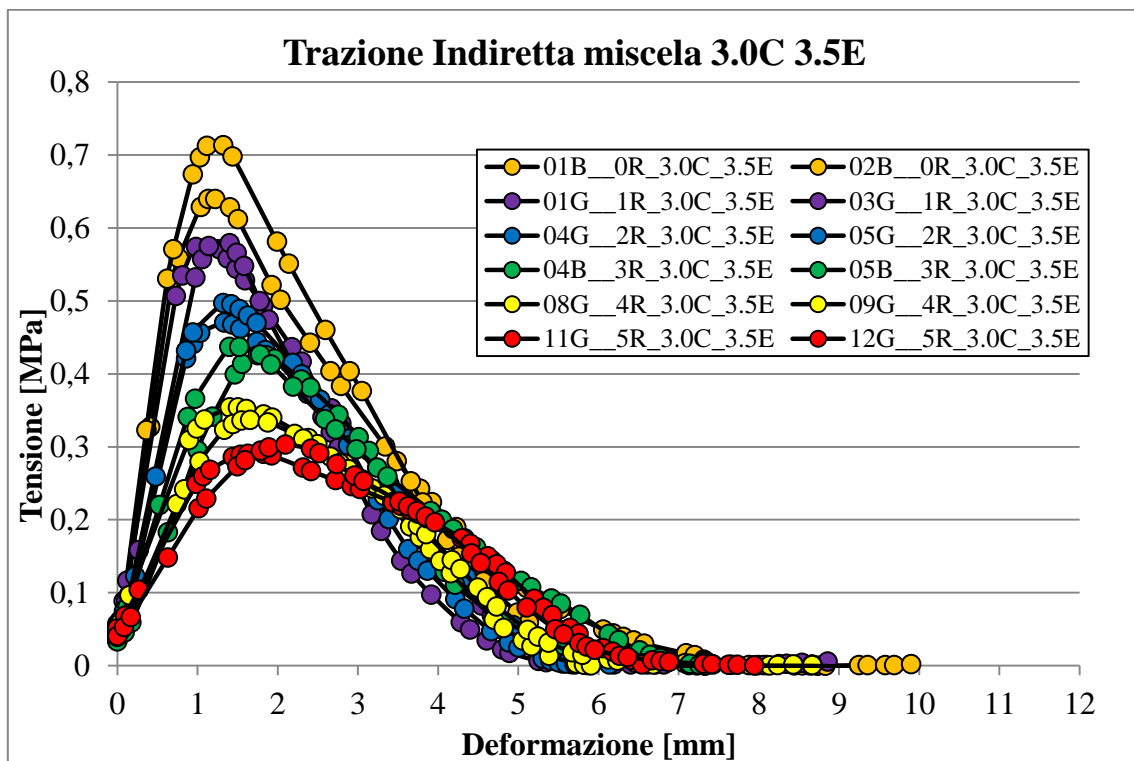


Figura 5. 38: ITS – Curva: Tensione - Deformazione dei campioni con 3.5% di Emulsione, 3.0% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

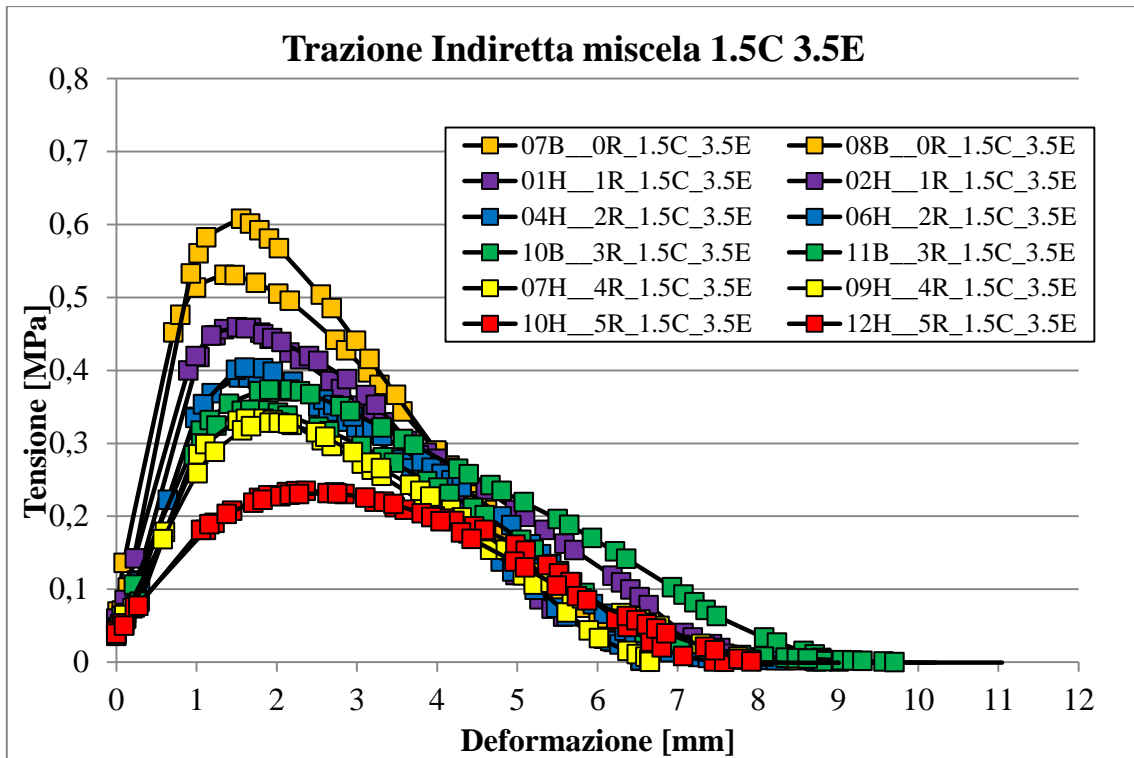


Figura 5. 39: ITS – Curva: Tensione - Deformazione dei campioni con 3.5% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

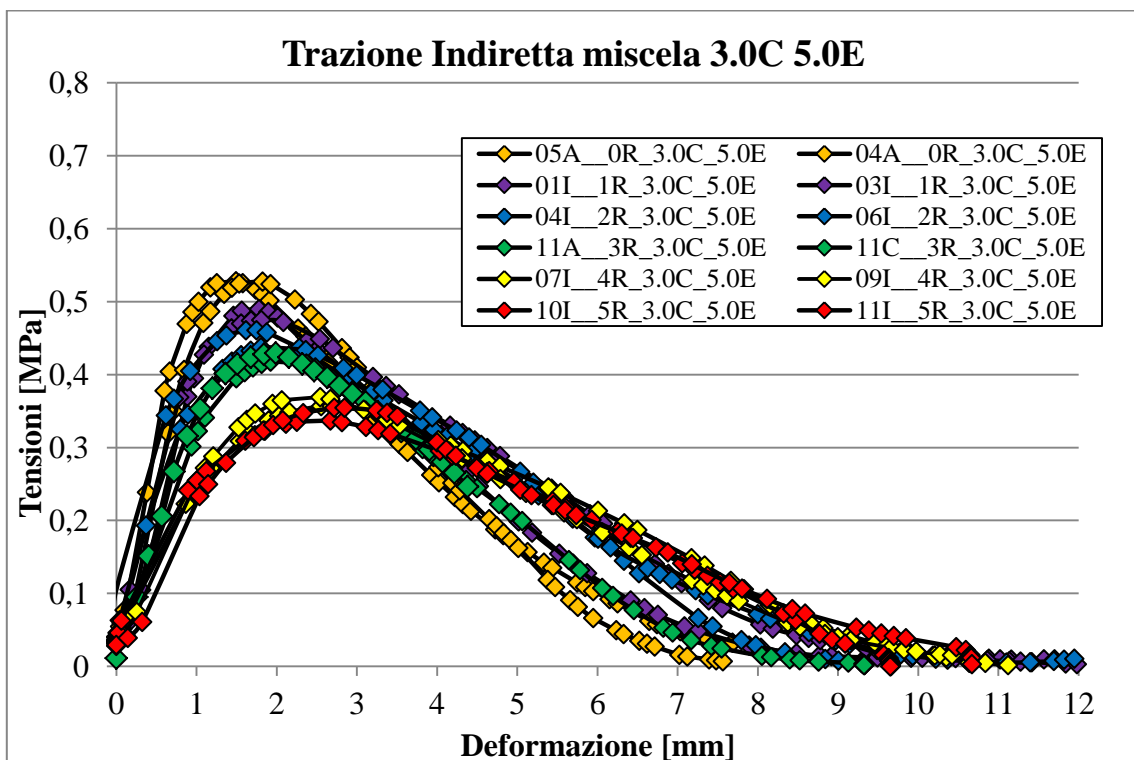


Figura 5. 40: ITS – Curva: Tensione - Deformazione dei campioni con 5.0% di Emulsione, 3.0% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

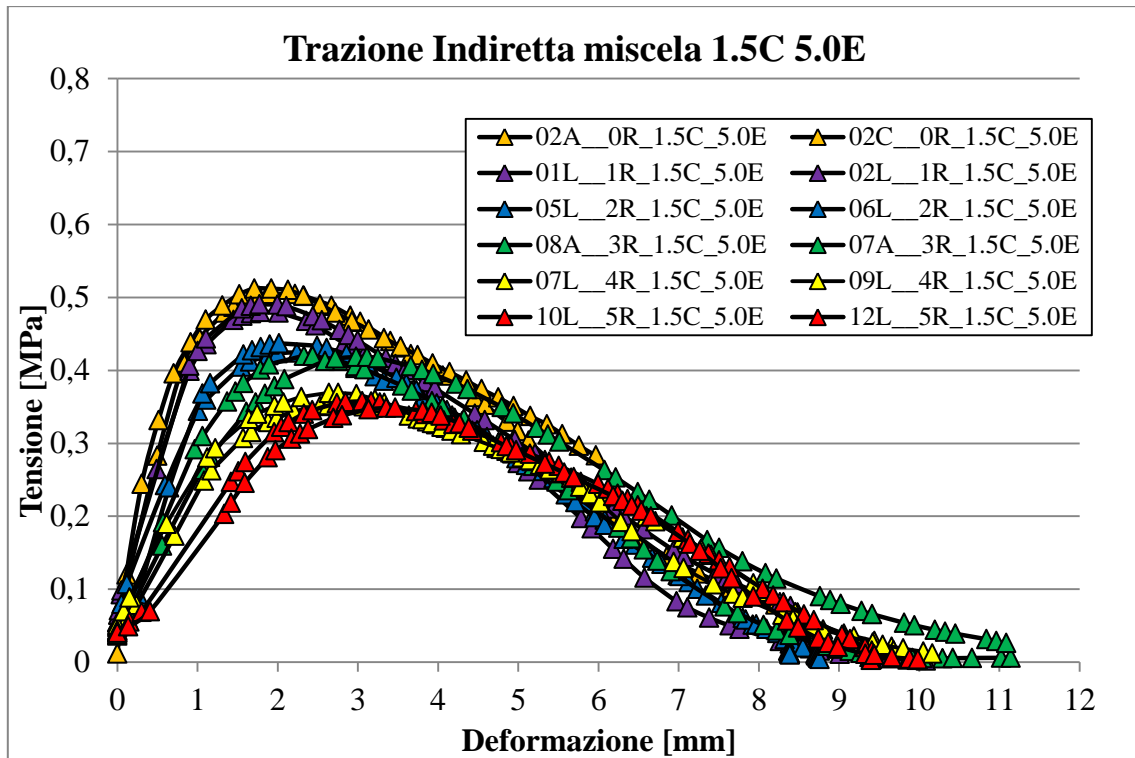


Figura 5. 41: ITS – Curva: Tensione - Deformazione dei campioni con 5.0% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

Confrontando le diverse miscele emerge, come logico, che a parità di Emulsione Bituminosa, il cemento ha un effetto di “rinforzo” all’interno dei provini che si traduce in valori di tensione di rottura maggiori. Questo effetto è maggiormente evidente nelle miscele con una minor percentuale di emulsione.

Un altro aspetto imputabile al cemento, è un incremento della fragilità del materiale che si traduce in campane più strette in particolare in corrispondenza dei picchi di carico.

A parità di Cemento, l’emulsione bituminosa ha un duplice effetto per quanto riguarda i valori di tensione di rottura: da un lato per miscele “povere” di CCR diminuisce notevolmente i valori di picco della tensione di rottura, dall’altro per miscele “ricche” di CCR, il valori massimi aumentano leggermente.

Questo avvalora maggiormente il fatto che il cemento vada in contrasto con il polverino di gomma mentre l'emulsione ne favorisce l'utilizzo nella miscela, come notato anche nello studio delle densità del materiale.

Un ulteriore effetto dell'emulsione bituminosa, è dato dall'aumento della duttilità del materiale che si traduce in un allungamento delle curve verso destra.

Analizzando in fine l'effetto del polverino di gomma a parità di Emulsione Bituminosa e Cemento, si può notare come oltre a diminuire i valori di carico massimo, i picchi tendano a traslare verso destra evidenziando un incremento di duttilità che si può far risalire alle caratteristiche elastiche del CCR.

5.4.4 TEST ITS: VALORI DELLE TENSIONI MASSIME A ROTTURA

Oltre all'analisi delle curve Tensione – Deformazione e Carico – Deformazione, è importante anche conoscere numericamente i valori delle resistenze a trazione indiretta.

In questo paragrafo vengono riportati sotto forma di istogrammi, i valori di ITS misurati nei diversi campioni analizzati in questa tesi.

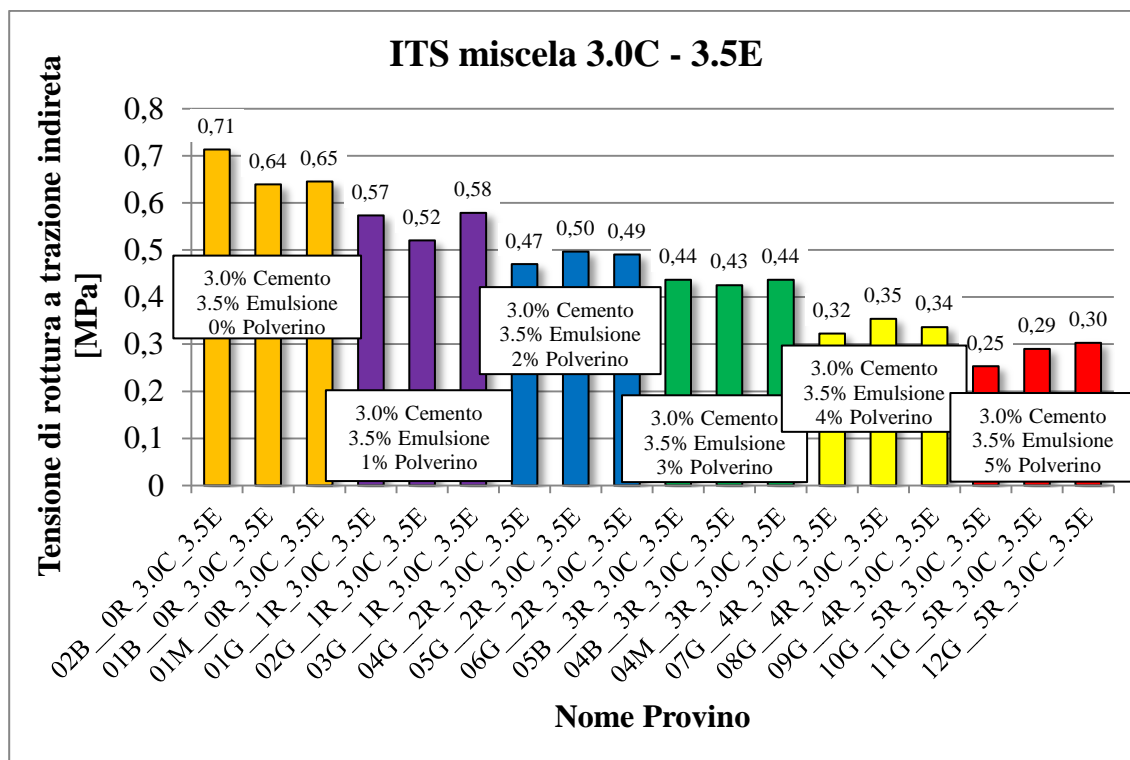


Figura 5. 42: ITS - Tensione di rottura dei campioni con 3.5% di Emulsione, 3.0% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

Sin dal primo grafico, è evidente come i valori di tensione a rottura, diminuiscano all'aumentare del polverino di gomma che diminuisce la rigidità del materiale.

Per la miscela contenente il 3.0% di cemento e il 3.5% di emulsione, l'aggiunta del polverino di gomma in tenore del 5% causa una riduzione maggiore del 50% in termini di Tensione di rottura.

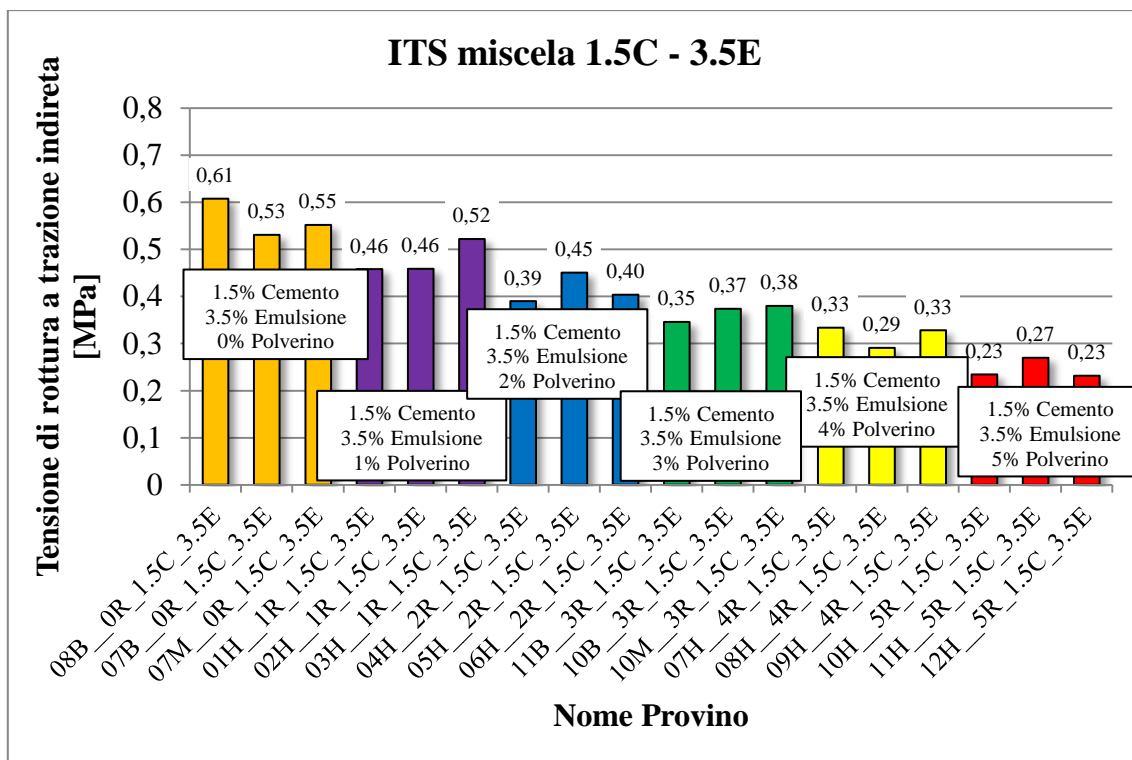


Figura 5. 43: ITS - Tensione di rottura dei campioni con 3.5% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

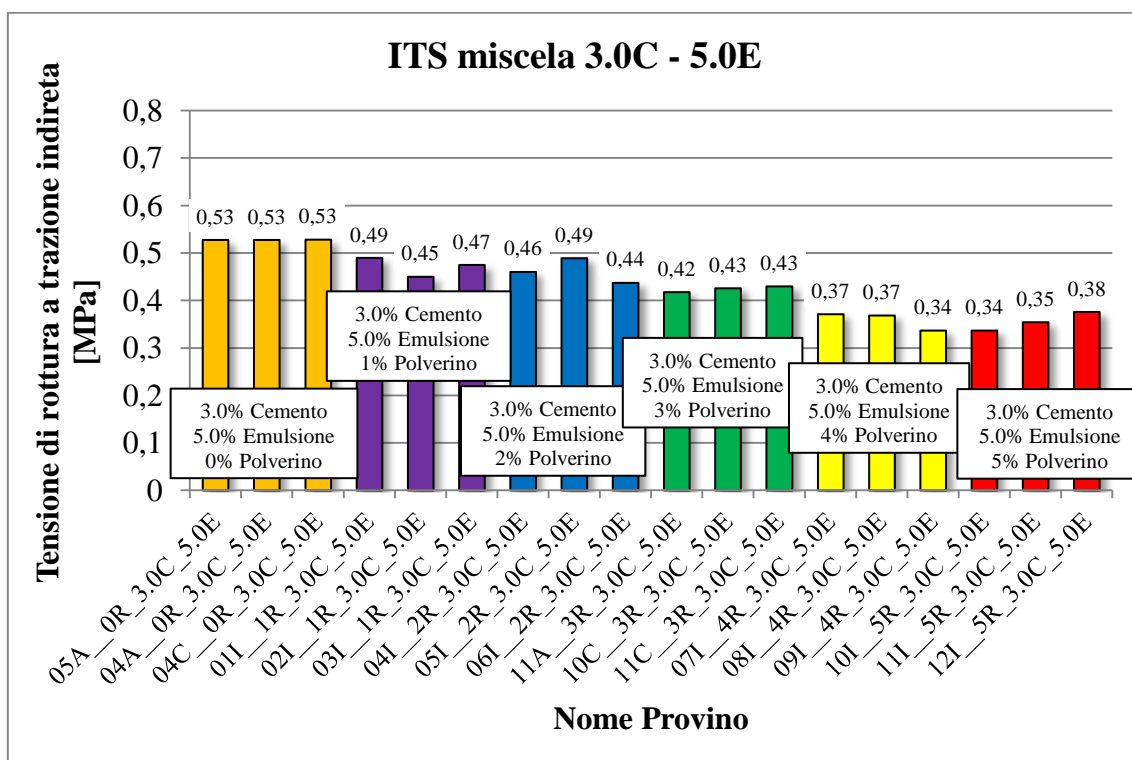


Figura 5. 44: ITS - Tensione di rottura dei campioni con 5.0% di Emulsione, 3.0% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

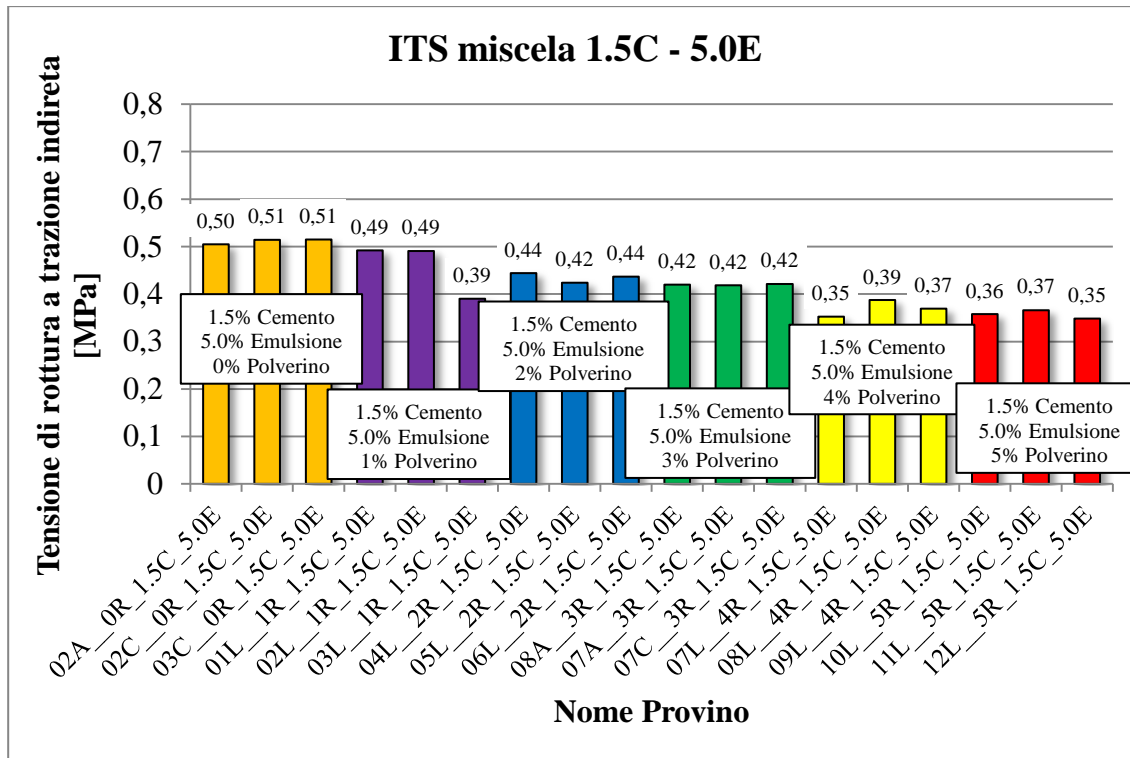


Figura 5. 45: ITS - Tensione di rottura dei campioni con 5.0% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

La tendenza a diminuire delle tensioni a rottura con l'aggiunta di CCR alle miscele, è più evidente nelle miscele povere di emulsione mentre in quelle ricche di emulsione bituminosa, il divario tra i provini con e senza polverino di gomma diminuisce.

Focalizzando l'attenzione sulle miscele con contenuto di emulsione pari al 5%, si noti che l'incremento del tenore di cemento dall'1.5 al 3%, non ha portato sostanziali incrementi in termini di resistenza. Questo aspetto può rivelarsi di notevole importanza nel momento in cui si esegue una valutazione economica delle miscele utilizzabili, nel contesto di un'analisi comparativa di diverse modalità di intervento ai fini dell'esecuzione di una determinata commessa.

Miscele contenenti 3% di cemento e 5% di emulsione possono risultare infatti molto costose, anche se si sottolinea la sussistenza di altre considerazioni di natura non prettamente economica nel processo decisionale.

Lo stesso ragionamento non può essere fatto su miscele con solamente il 3.5% di emulsione in quanto, in questo caso l'effetto del cemento non è trascurabile essendo prevalente rispetto al legante bituminoso e le resistenze ITS aumentano sensibilmente incrementando la dose di cemento.

5.4.5 TEST ITS: ANDAMENTO DELLE TENSIONI MASSIME A ROTTURA

Dall'analisi degli istogrammi al paragrafo precedente, è sembrato necessario un ulteriore approfondimento che analizzasse la relazione tra i valori massimi di tensione (ITS) e la rispettiva deformazione a rottura.

I dati misurati sono stati riportati in grafici sui quali sono rappresentate in ordinata: Tensioni ITS e Deformazione massime, e in ascissa le varie % di CCR.

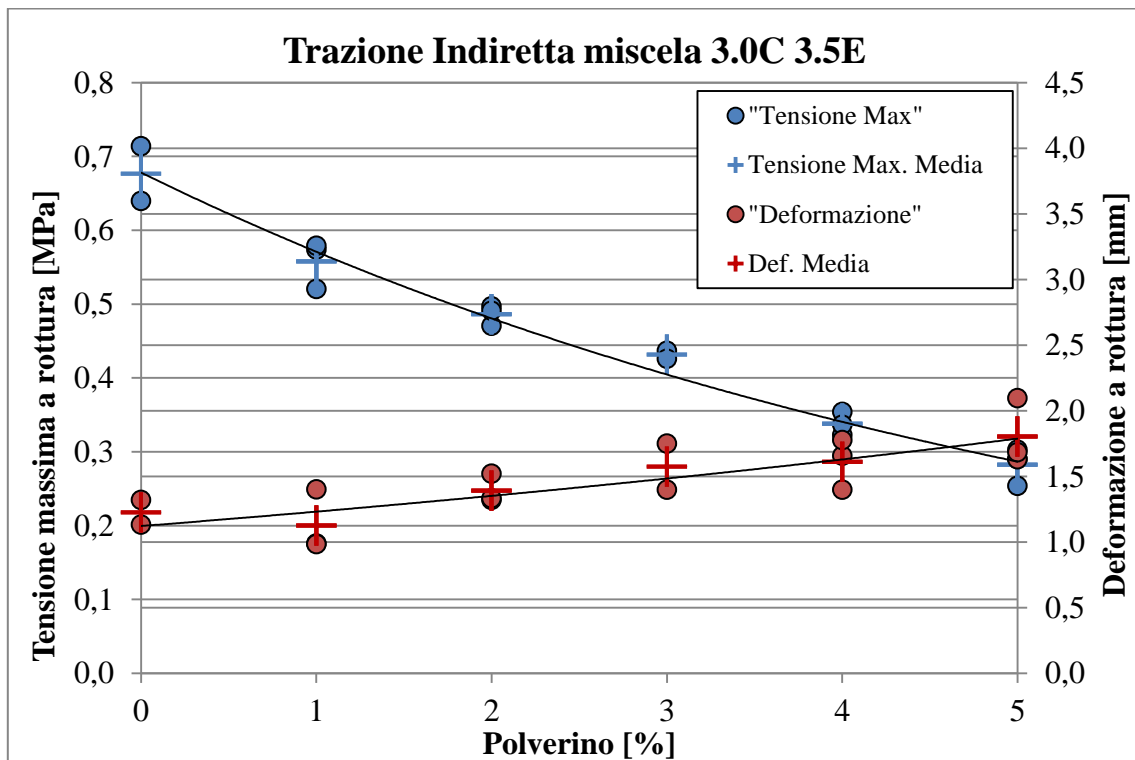


Figura 5. 46: ITS –Tensione Massima e Deformazione a rottura dei campioni con 3.5% di Emulsione, 3.0% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

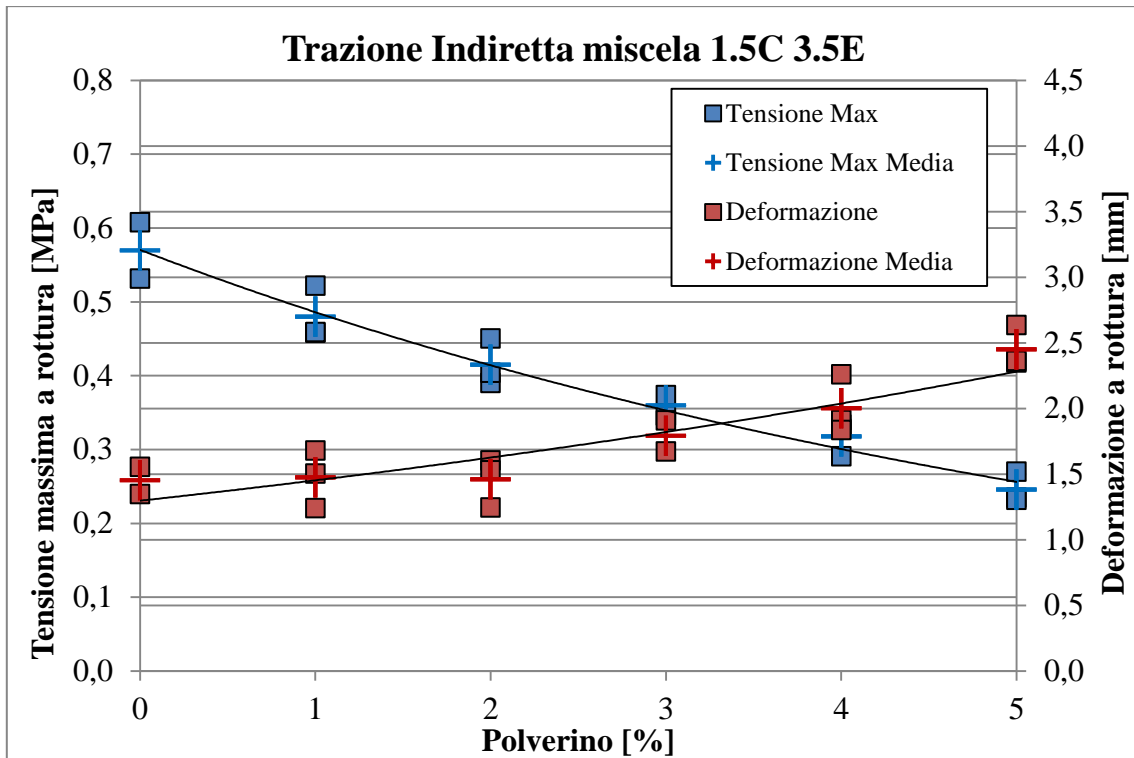


Figura 5. 47: ITS –Tensione Massima e Deformazione a rottura dei campioni con 3.5% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

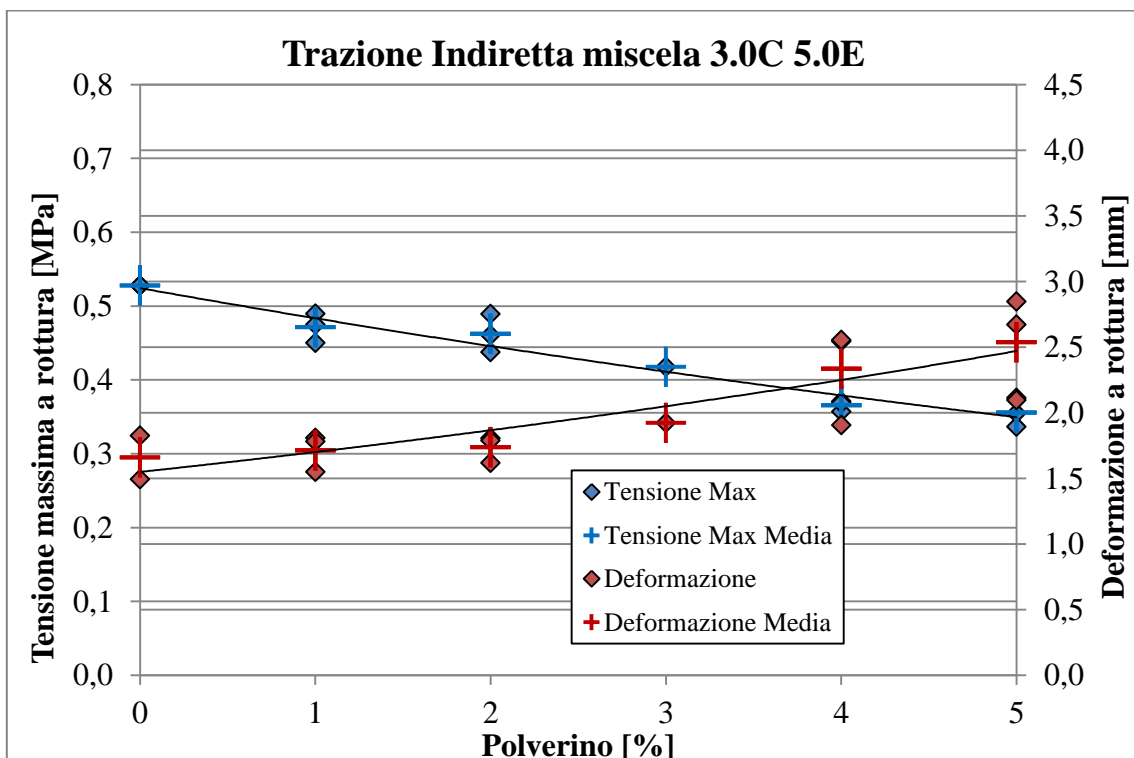


Figura 5. 48: ITS –Tensione Massima e Deformazione a rottura dei campioni con 5.0% di Emulsione, 3.0% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

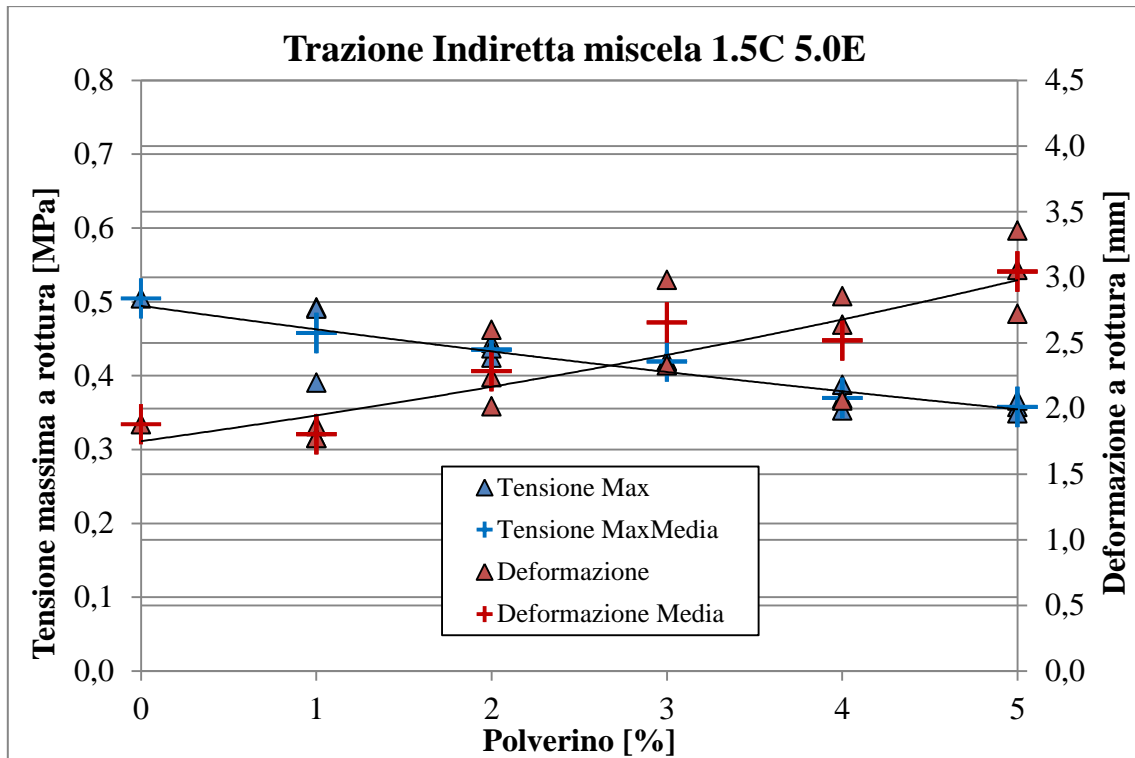


Figura 5. 49: ITS –Tensione Massima e Deformazione a rottura dei campioni con 5.0% di Emulsione, 1.5% di Cemento e Polverino di gomma in dosaggi variabili dallo 0% al 5%

Questi grafici evidenziano in modo più chiaro e leggibile quanto detto nel paragrafo precedente sulla diminuzione della tensione massima a rottura all’aumentare del CCR. Allo stesso tempo mostrano in che modo aumenta la deformazione con l’incremento dei dosaggi di Polverino di Gomma.

Le pendenze delle curve di tensione, ottenute per interpolazione dei punti di colore blu, mettono in risalto l’effetto del polverino sulle resistenze dei materiali.

Le miscele con emulsione al 5% sono caratterizzate da una inclinazione minore ovvero, sono meno sensibili all’effetto del polverino, mentre le miscele con emulsione al 3% risultano molto più inclinate. Questo comportamento è imputabile al fatto che l’emulsione bituminosa leghi bene con il polverino di gomma al contrario del cemento, quindi l’incremento di emulsione favorisce la resistenza del materiale ricco di CCR e al

tempo stesso, riduce le tensioni a rottura in quello povero di CCR, dove prevale il contributo del cemento.

Analizzando le curve di deformazione, le miscele con la maggior percentuale di emulsione presentano un salto verso l'alto rispetto a quelle che ne hanno meno, a ragione del fatto che l'emulsione contribuisce all'aumento delle deformazioni a rottura del materiale.

Se si confrontano poi miscele con diversi dosaggi di cemento, a parità degli altri costituenti, quelle con percentuali maggiori di cemento denotano un comportamento più fragile che si traduce in curve meno inclinate e deformazioni a rottura minori.

Questo effetto è più evidente nelle miscele con minor emulsione in quanto il cemento prevale sull'emulsione bituminosa.

Per poter quantificare numericamente l'effetto che CCR, Cemento ed Emulsione hanno sulle miscele, si riportano i dati misurati per ogni singola miscela nella Tabella 5. 9.

CCR %	3.0C_3.5E				CCR %	3.0C_5.0E			
	ITS (Mpa)	Def. (mm)	ITS (Norm.)	Def. (Norm.)		ITS (Mpa)	Def. (mm)	ITS (Norm.)	Def. (Norm.)
0	0,67	1,23	1,00	1,00	0	0,53	1,66	1,00	1,00
1	0,56	1,12	0,84	0,92	1	0,47	1,71	0,89	1,03
2	0,49	1,39	0,73	1,13	2	0,46	1,74	0,88	1,05
3	0,43	1,57	0,65	1,28	3	0,42	1,92	0,80	1,16
4	0,34	1,61	0,51	1,31	4	0,36	2,33	0,68	1,41
5	0,28	1,80	0,42	1,47	5	0,36	2,54	0,67	1,53
CCR %	1.5C_3.5E				CCR %	1.5C_5.0E			
	ITS (Mpa)	Def. (mm)	ITS (Norm.)	Def. (Norm.)		ITS (Mpa)	Def. (mm)	ITS (Norm.)	Def. (Norm.)
0	0,56	1,45	1,00	1,00	0	0,51	1,88	1,00	1,00
1	0,48	1,47	0,85	1,02	1	0,46	1,80	0,90	0,96
2	0,41	1,46	0,74	1,00	2	0,44	2,28	0,85	1,22
3	0,37	1,79	0,65	1,23	3	0,42	2,65	0,82	1,41
4	0,32	2,00	0,56	1,38	4	0,37	2,52	0,72	1,34
5	0,25	2,45	0,44	1,69	5	0,36	3,04	0,70	1,62

Tabella 5. 9: Valori ITS e Deformazioni corrispondenti

In questa tabella, oltre ai valori in MPa delle tensioni e quelli in mm delle deformazioni, sono stati calcolati i valori normalizzati di queste grandezze (Norm.) che mostrano la variazione rispetto al campione senza polverino della miscela.

Prendendo ad esempio la miscela 3.0C_3.5E, per il provino CCR% = 5, il valore 0.42 della tensione Norm. rappresenta una riduzione rispetto al provino senza CCR del 58%, mentre il valore 1.47 della deformazione Norm. rappresenta un incremento delle deformazioni del 47%.

Questi dati, oltre a confermare quanto analizzato dai grafici a inizio paragrafo, permettono di ipotizzare dosaggi ottimali di polverino in relazione alla tipologia di miscela:

- 1-2% di CCR per miscele con 3.0% di Cemento e 3.5% di Emulsione
- 2-3% di CCR per miscele con 3.0% di Cemento e 5.0% di Emulsione
- 1-2% di CCR per miscele con 1.5% di Cemento e 3.5% di Emulsione
- 2-3% di CCR per miscele con 1.5% di Cemento e 5.0% di Emulsione

I dosaggi ricavati dalla tabella prendono in considerazione solamente i valori di ITS e deformazione. Valori più alti di Polverino causerebbero un aumento elevato delle deformazioni e una diminuzione sensibile delle tensioni a rottura che renderebbero sconsigliabile l'utilizzo dello stesso.

5.4.6 CONSIDERAZIONI FINALI

Dai test di trazione indiretta, è stato possibile dunque valutare l'effetto che polverino, emulsione bituminosa e cemento hanno sulle diverse miscele.

- L'Emulsione Bituminosa si sposa bene con il polverino di gomma e ne favorisce l'utilizzo limitando sensibilmente l'effetto negativo in termini di riduzione di resistenza ITS. Inoltre, fornisce un incremento di duttilità al materiale che quindi risulta maggiormente deformabile.
- Il Cemento, per bassi dosaggi di emulsione, conferisce una maggiore rigidità e resistenza ai materiali, cosa che non accade nelle miscele ricche di emulsione: l'effetto di quest'ultima prevale sul primo e l'incremento diviene trascurabile. In relazione al polverino di gomma, l'effetto migliorativo del cemento diminuisce al crescere delle percentuali di CCR presenti nei campioni, mettendo in evidenza come polverino e cemento non collaborino adeguatamente.
- Il Polverino di Gomma, infine, agisce sulla miscela riducendo le resistenze a trazione indiretta, in particolar modo per provini con elevati tenori di cemento e basse percentuali di emulsione.

5.5 FASE 4: TEST ITSM PER LA DETERMINAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA

5.5.1 DEFINIZIONI E TEORIA PER LA DETERMINAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA

Il conglomerato costituente la sovrastruttura stradale, è sottoposto alle sollecitazioni che gli vengono imposte dal traffico veicolare. Si riscontrano due differenti tipi di sollecitazione: i veicoli leggeri e più veloci causano carichi di minore entità e di minore durata, quelli pesanti e più lenti provocano carichi di maggiore entità e maggiore durata. Evidentemente, la sollecitazione complessiva agente su di uno strato della sovrastruttura stradale è data dall'insieme dei due tipi, è necessario quindi valutarne le reazioni del conglomerato. In laboratorio la prova viene effettuata applicando sollecitazioni di tipo dinamico misurando sia l'entità della deformazione, che fornisce indicazioni sulla rigidità, sia il ritardo con cui questa si esplica, così da poter quantificare anche la componente viscosa.

Il test viene eseguito con il supporto di un software con il quale è possibile controllare automaticamente tutte le variabili in gioco: il tempo di picco del carico applicato, la tensione di target fissata, il coefficiente di Poisson, la temperatura di prova, la sollecitazione effettiva di trazione sul diametro verticale, ecc.

Una scelta adeguata delle condizioni di prova (velocità d'applicazione dei carichi e temperatura) fa sì che possa essere applicata la teoria dell'elasticità lineare. Il materiale è assunto inoltre come omogeneo ed isotropo.

Nella prova ITSM (indirect tensile modulus test), il modulo di rigidità del campione è funzione della geometria del provino, della deformazione orizzontale e del coefficiente di Poisson.

Lo stato di sollecitazioni che si sviluppano durante lo svolgimento della prova possono essere schematizzate nella Figura 5. 50. Lungo il diametro orizzontale le sollecitazioni medie e massime in trazione nella direzione x ed in compressione su y sono date rispettivamente dalle espressioni:

$$\begin{aligned}
 1) \quad \sigma_{x(\max)} &= \frac{2 * P}{\pi * d * h} & 2) \quad \sigma_{y(\max)} &= \frac{-6 * P}{\pi * d * h} \\
 \sigma_{x(\text{media})} &= \frac{0.273 * P}{\pi * d * h} & \sigma_{y(\text{media})} &= \frac{-P}{d * h}
 \end{aligned}$$

dove: P è il carico applicato,
 d il diametro
 h lo spessore o altezza del campione.

Il modulo di rigidità elastica, sulla base di questa teorica distribuzione delle sollecitazioni, può essere rappresentato in termini di deformazione di un elemento, soggetto ad uno stato biassiale di tensioni. La corrispondente deformazione orizzontale dell'elemento è:

$$3) \quad \varepsilon_{x(\text{media})} = \frac{\sigma_{x(\text{media})}}{E} - \nu \frac{\sigma_{y(\text{media})}}{E}$$

dove: E è il modulo elastico del materiale
 ν è il rapporto di Poisson.

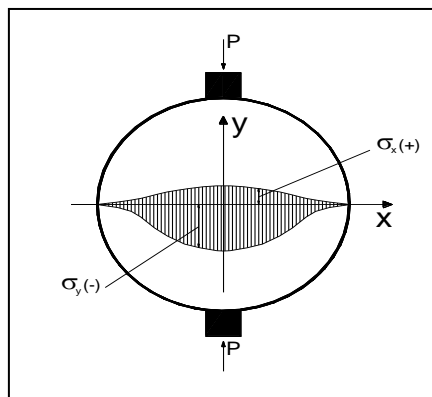


Figura 5. 50: Stato tensionale nella configurazione a T.I.

Sostituendo ora le espressioni (1) e (2) corrispondenti ai valori medi e tenendo conto che la deformazione orizzontale totale dei campioni (Δ) si ottiene moltiplicando la deformazione unitaria ε media per il diametro del campione, si ottiene la formula (4):

$$4) \quad \Delta = \frac{0.273 * P}{E * h} + \nu \frac{P}{E * h}$$

Dalla (4) è facile ricavare il modulo elastico che avrà la seguente espressione (5):

$$5) \quad E = \frac{P}{\Delta * h} * (0.273 + \nu)$$

La normativa UNI EN 12697-26 definisce il modulo di rigidezza E come il modulo del modulo complesso. Quest'ultimo è rappresentato mediante un numero complesso definito da una componente elastica reale (6) e una viscosa immaginaria (7):

$$6) \quad E_1 = |E^*| * \cos\varphi \quad (\text{componente elastica o modulo di restituzione})$$

$$7) \quad E_2 = |E^*| * \sin\varphi \quad (\text{componente viscosa o modulo di dissipazione})$$

dove: $|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}; \quad \varphi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right).$

Il software fornisce anche un valore del modulo di rigidezza corretto da un fattore di aggiustamento che tiene conto della forma dell'onda di carico che di volta in volta la macchina trasferisce al campione e della temperatura attuale di prova. Tale modulo è detto aggiustato e si ricava dalla seguente relazione (8):

$$8) \quad E^I = E * (1 - 0.322 * (\log(E) - 1.82) * (0.60 - k))$$

dove k è il fattore dell'area di carico misurato

Il carico P, responsabile delle tensioni interne e della deformazione, avrà, come già detto, la forma di un impulso (Figura 5. 51) e sarà definito, per il corretto svolgimento della prova, da tre parametri fondamentali:

- 1) peak load (il carico massimo applicato ad ogni ciclo);
- 2) pulse repetition period (tempo che intercorre tra l'inizio di due impulsi consecutivi);
- 3) rise time (tempo trascorso tra l'inizio dell'impulso e il peak load);

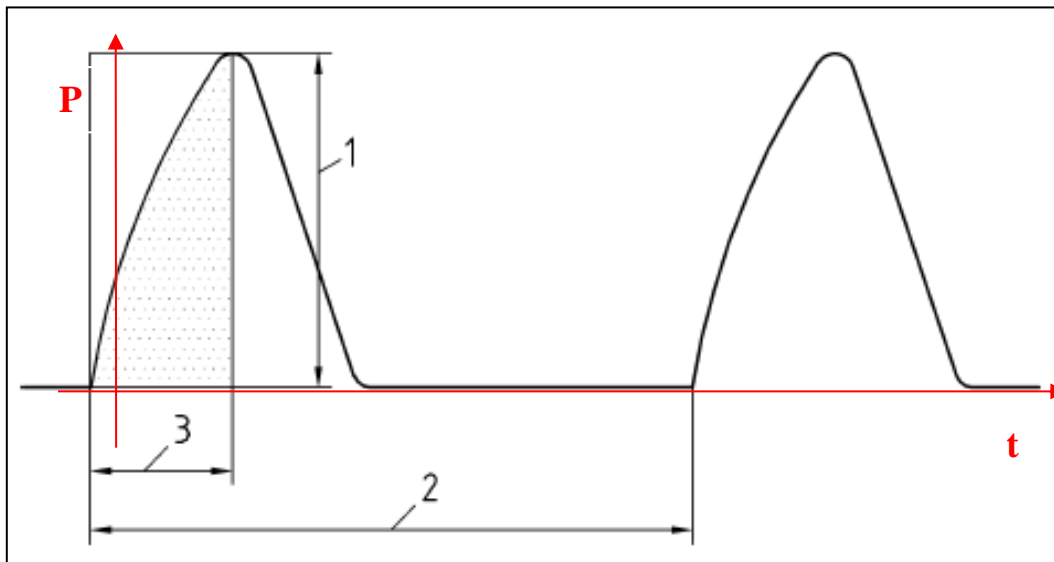


Figura 5. 51: Variazione del carico P in funzione del tempo t

La normativa di riferimento considerata nella sperimentazione è la EN 12697-26 e, data l'importanza di questi parametri nella giusta determinazione del modulo, ne fissa gli intervalli affinché lo studio possa essere riconosciuto valido. Per provini di diametro 150 mm, il rise time raccomandato è di $124 \pm 4 \text{ ms}$, il peak load sarà scelto in funzione della deformazione orizzontale che dovrà rientrare nell'intervallo $7 \pm 2 \mu\text{m}$ ed il pulse repetition period sarà $3,0 \pm 0,1 \text{ s}$.

5.5.2 DESCRIZIONE DEL TEST ITSM (INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS)

5.5.2.1 DESCRIZIONE DELLE APPARECCHIATURE DI PROVA

L'apparecchiatura utilizzata, secondo la EN 12697-26, è il MatTa, composta da una struttura di carico, un'unità pneumatica, un sistema computerizzato di acquisizione e controllo dati e una cella climatica con controllo della temperatura (Figura 5. 52).



Figura 5. 52: Foto del MatTa in dotazione al LAS del DICAM dell'università di Bologna.

La struttura è costituita da una base (Figura 5. 53.a), da due montanti verticali (Figura 5. 53.b), da una trave di contrasto orizzontale (Figura 5. 53.b) e da un attuatore pneumatico collegato ad un pistone per l'applicazione dei carichi verticali (Figura 5. 53.b).

Collegata al pistone vi è una cella di carico che trasmette le sue misure all'unità di controllo e acquisizione dati (Figura 5. 54). La posizione della trave di contrasto può essere regolata a piacimento, purché sempre livellata e fissata saldamente, mediante serraggio manuale di dadi e controdadi zigrinati presenti su entrambi i montanti.

La forma dell'impulso di carico, descritta dal suo "rise-time", dipende dal controllo operato in continuo dalla cella di carico e dalla compressibilità dell'area presente all'interno dell'attuatore pneumatico il quale, tramite un pistone consente l'applicazione di forze verticali. La deformazione orizzontale, derivante da tali impulsi, viene misurata attraverso

appositi LVDT collegati al sistema computerizzato che li registra ed in relazione ai carichi applicati determina il modulo di rigidezza.



Figura 5. 53: a: base di appoggio del provino, b: elementi della struttura di carico

L'unità pneumatica è formata da una serie di elementi collegati tra loro da tubi in plastica e connessioni ad innesto rapido. L'aria entra quindi nell'attuatore di carico attraverso una valvola solenoidale che si apre e si chiude a seconda delle necessità.

L'unità di controllo e acquisizione dati fornisce energia elettrica agli organi di controllo e permette di gestire la prova direttamente dal personal computer attraverso un software specifico.



Figura 5. 54: unità di controllo dati (CDAS).

5.5.2.2 PREPARAZIONE DEL PROVINO

La procedura inizia con l'allestimento del provino il quale, dopo un condizionamento di alcune ore in camera climatica a una temperatura di 20°C, viene collocato tra i due coltelli di carico (freccie rosse in Figura 5. 55) sotto l'attuatore. Un supporto metallico opportunamente fissato permette di posizionare gli LVDT sul diametro orizzontale al fine di misurarne lo spostamento micrometrico (cerchiati in giallo in Figura 5. 55).

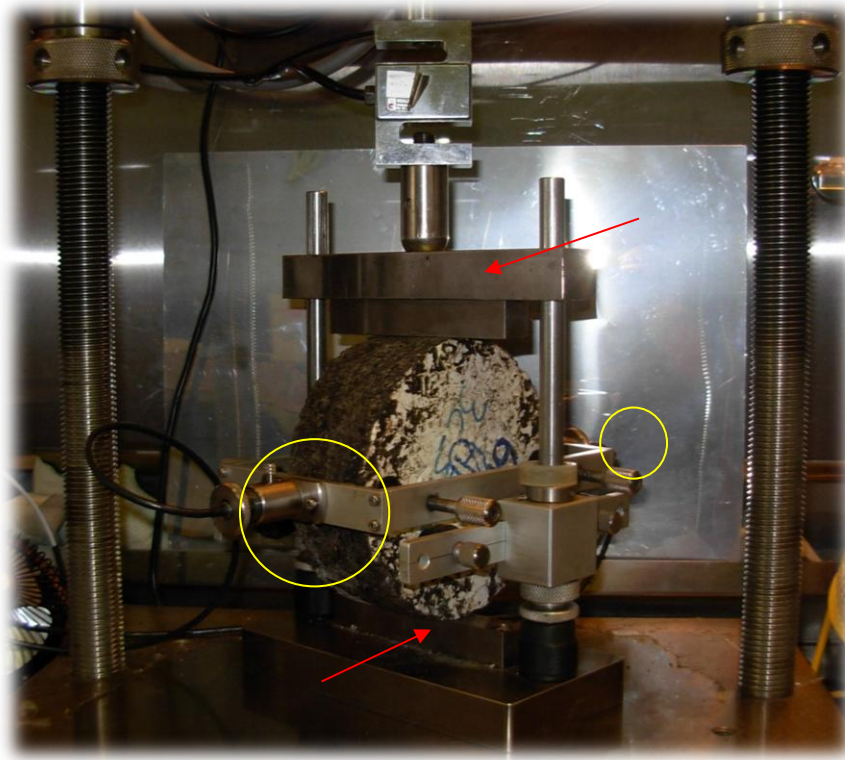


Figura 5. 55: Allestimento del provino per la prova di modulo

Come si può vedere dalla figura l'allestimento è complesso, di seguito saranno descritte tutte le componenti singolarmente.

- *Il telaio principale* serve per sostenere il provino che viene appoggiato sulla barra di carico inferiore posizionata al centro della base. Un altro elemento molto importante è un sistema di barre, opportunamente rialzato rispetto alla

base a seconda delle dimensioni dei campioni, che fungerà da guida per il telaio porta trasduttori (Figura 5. 56.a) .

- *Il telaio porta trasduttori* sostiene i trasduttori di spostamento che grazie ad esso vengono posizionati in corrispondenza di un diametro orizzontale del provino (Figura 5. 56.b).
- *La barra di carico o coltello superiore* viene inserita dopo aver posizionato il provino cilindrico sulla base, precisamente sulla barra di carico inferiore, e dopo aver fissato ad esso il telaio porta trasduttori (Figura 5. 56.c)

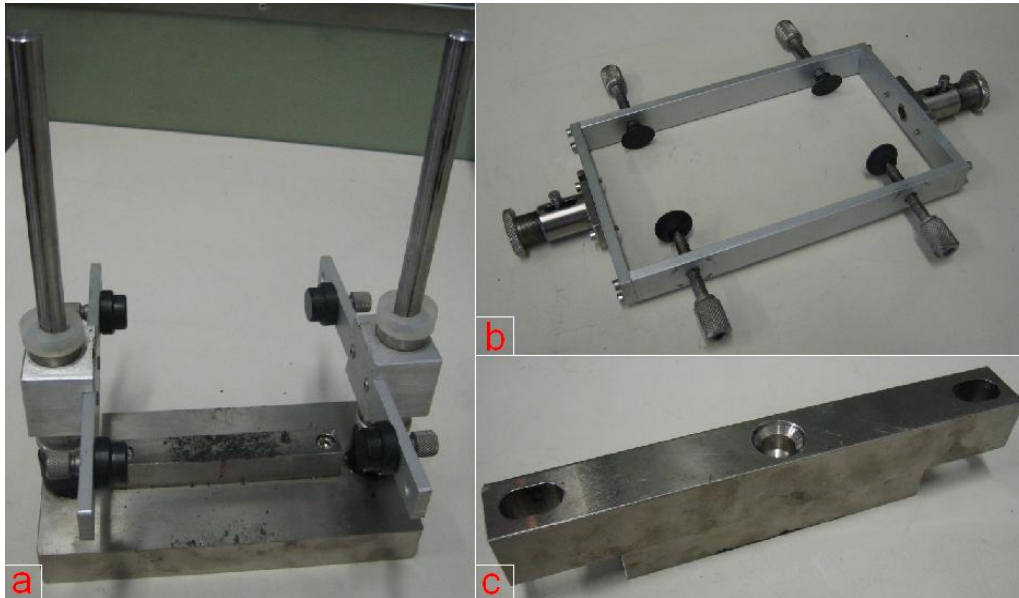


Figura 5. 56: Elementi per l'allestimento del provino

5.5.2.3 MODALITÀ DI SVOLGIMENTO DEL TEST

Una volta sistemato il provino nell'apposito telaio e quest'ultimo sotto il pistone di carico, inseriti nel computer i parametri che definiscono il carico e le dimensioni del campione, si dà inizio alla prova.

La prima fase della prova è caratterizzata dagli impulsi di condizionamento che possono variare in numero, generalmente se ne usano da 5 a 10. Il CDAS ne controlla la forza affinché si abbiano i 5 µm di deformazione orizzontale operando una serie di loop di taratura. Questi permettono quindi di individuare il carico da applicare affinché il campione subisca la deformazione orizzontale precedentemente fissata ed inoltre favoriscono l'assestamento delle strisce di carico sulla superficie del campione.

Nella seconda fase avviene la misurazione del Modulo di rigidezza (ITSM) e del modulo di rigidezza aggiustato (ITSM adjusted). In questo momento la macchina fornisce 5 impulsi sul campione che saranno caratterizzati da un peak load calcolato nella fase precedente, un pulse repetition period ed un rise time costanti e pre-inseriti nel software al momento dell'inizio della prova (Figura 5. 57).

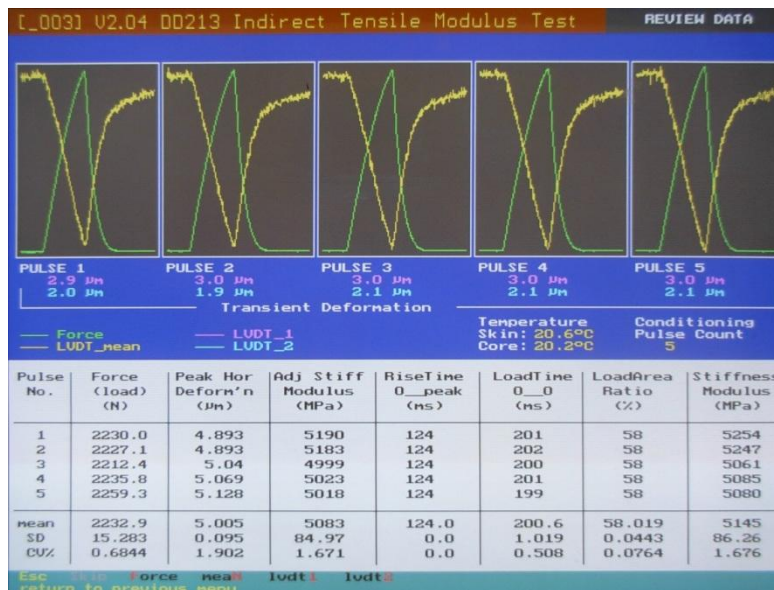


Figura 5. 57: esempio di schermata per la misurazione dei moduli mediante MatTa

La misurazione dei moduli deve essere fatta almeno in due direzioni ortogonali e affinché i risultati possano essere considerati validi non dovranno differire di più del 10% e meno del 20% dal loro valore medio.

La Figura 5. 58 mostra le corrispondenti curve di carico e deformazione in funzione del tempo per un impulso.

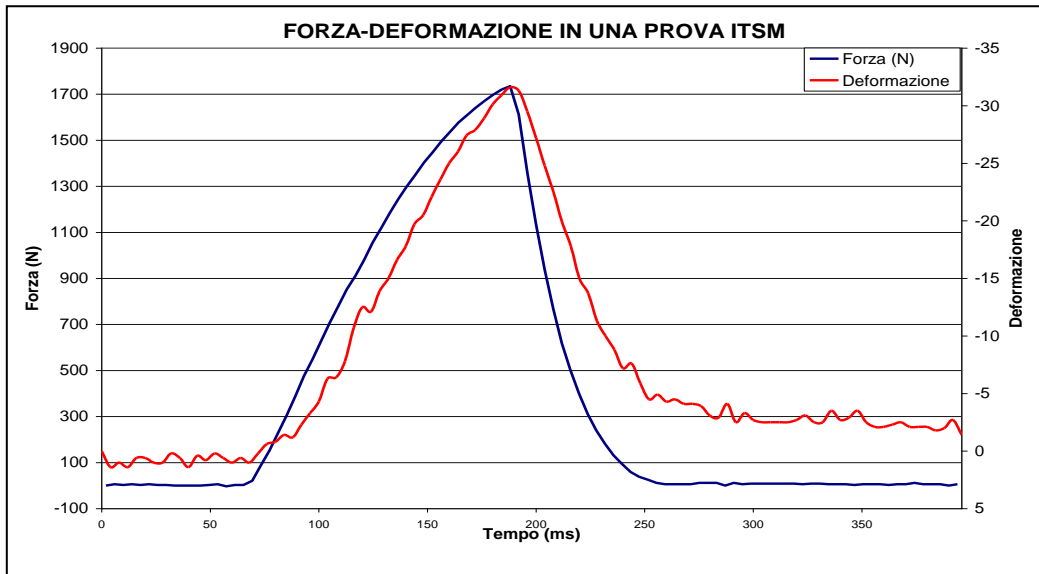


Figura 5. 58: rappresentazione di un impulso e della conseguente deformazione nel test per la determinazione dell'ITSM.

In questo studio, sono stati calcolati i moduli di rigidità in diversi momenti: dopo 6 giorni di maturazione, dopo 24 giorni, dopo 80 giorni e dopo 120giorni. Questo ha permesso di valutare l'incremento in termini di modulo ITSM dovuto alla maturazione del campione.

In seguito si è deciso di studiare anche la sensibilità termica delle miscele andando a valutare i moduli per tre diverse temperature (10, 20 e 30 °C) dopo 120 giorni di maturazione.

5.5.3 I RISULTATI DEL TEST ITSM

5.5.3.1 IMPOSTAZIONE DEL SOFTWARE

I parametri inseriti nel software per un corretto svolgimento della prova, nel rispetto della normativa di riferimento (UNI EN 12697-26), sono riportati nella Tabella 5. 10.

IMPOSTAZIONI DEL SOFTWARE	
Temperatura del test (°C)	20
Diametro (mm)	150
Altezza (mm)	59
Impulsi di condizionamento	5
Pulse repetition period (ms)	3000
Rise time (ms)	125
Target peak deformation (μm)	5
Coeff. Di Poisson	0,25

Tabella 5. 10: Parametri di configurazione del test

5.5.3.2 VALORI DI ITSM DOPO 6, 24, 80 E 120 GIORNI

Ricordando che i test ITSM sono stati svolti considerando tutte e 4 le miscele di progetto ma prendendo in considerazione solamente due dosaggi di polverino ovvero lo 0% e il 3%, i risultati di ITSM possono essere riassunti nella Tabella 5. 11.

dati provino	6 gg		24 gg		80 gg		120 gg	
	adj ITSM [Mpa]	adj ITSM [Mpa]	Δ ITSM [Mpa]	adj ITSM [Mpa]	Δ ITSM [Mpa]	adj ITSM [Mpa]	Δ ITSM [Mpa]	
1.5C_5E	2911,5	3404,5	493	4372,25	967,75	4481,75	109,5	
1.5C_5E+R	2383,5	2542,25	158,75	2964,75	422,5	3012,25	47,5	
3C_5E	3430,5	3791,25	360,75	4590	798,75	4654,75	64,75	
3C_5E+R	2884	3209,5	325,5	3662	452,5	3710	48	
3C_3.5E	5362,5	6332,25	969,75	7057	724,75	7163,75	106,75	
3C_3.5E+R	3254,75	3644,5	389,75	3720	75,5	3755,75	35,75	
1.5C_3.5E	4635,25	5002,25	367	6060	1057,75	6218,5	158,5	
1.5C_3.5E+R	2237,75	2733	495,25	2736	3	2736,5	0,5	

Tabella 5. 11: Risultati moduli ITSM dopo 6, 24, 80 e 120 giorni di maturazione

I valori di questa tabella, fanno tutti riferimento alla temperatura di prova di 20°C. Per avere una più rapida e facile lettura, i dati tabellati, sono stati sintetizzati nella Figura 5. 59.

Per semplificare i nomi, è stata adottata la dicitura +R per indicare le miscele con 3% di CCR mentre non è stato specificato nulla in quelle in cui non è presente.

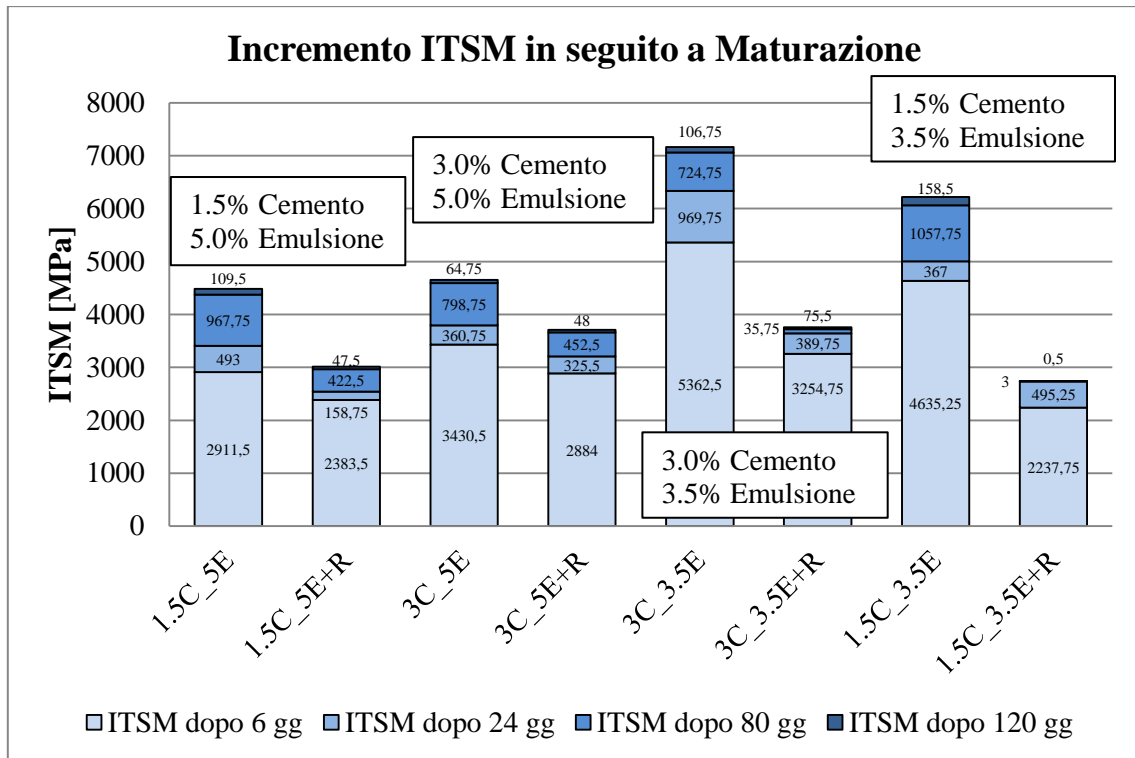


Figura 5. 59: Valori dei moduli ITSM dopo 6 giorni di maturazione e incremento a 24 gg., 80 gg. e 120 gg.

A parità di tempi di maturazione, è subito evidente come l’inserimento nelle miscele del polverino di gomma diminuisca i valori di modulo di rigidezza.

La diminuzione di ITSM imputabile al polverino di gomma, espressa in percentuale rispetto al valore massimo raggiunto dalla corrispondente miscela senza CCR, è maggiore per le miscele povere di Emulsione. Infatti per le miscele con Emulsione al 5% e Cemento al 3.0%, l’aggiunta del CCR riduce il modulo ITSM del 20% mentre, per le miscele con analoga quantità di cemento e Emulsione in tenore del 3.5% la riduzione di ITSM è pari al 48% (Figura 5. 60). Analoga considerazione può essere fatta nelle miscele con Cemento al’1.5% dove la riduzione del ITSM è pari al 56% e al 33% rispettivamente per le miscele Povere e Ricche di emulsione (Figura 5. 61).

Una ulteriore analisi, può essere fatta valutando l’effetto del Cemento sulla miscela, a parità di Emulsione e CCR.

In questo caso il cemento aumenta sempre il valore di ITSM passando dal 1.5% al 3%. Si fa notare inoltre che l'aumento di modulo di rigidezza, è maggiore nelle miscele contenenti polverino di gomma. Per miscele con Emulsione Bituminosa al 3.5% senza CCR, l'incremento di ITSM dovuto all'aggiunta di cemento è pari a +15%, la corrispondente miscela con CCR invece in seguito all'incremento di cemento subisce una variazione del modulo ITSM del +37%. Allo stesso modo, le miscele con Emulsione al 5.0% sviluppano un incremento di ITSM dovuto all'aggiunta di cemento pari a +5% e +23% rispettivamente per i campioni senza CCR e quelli con.

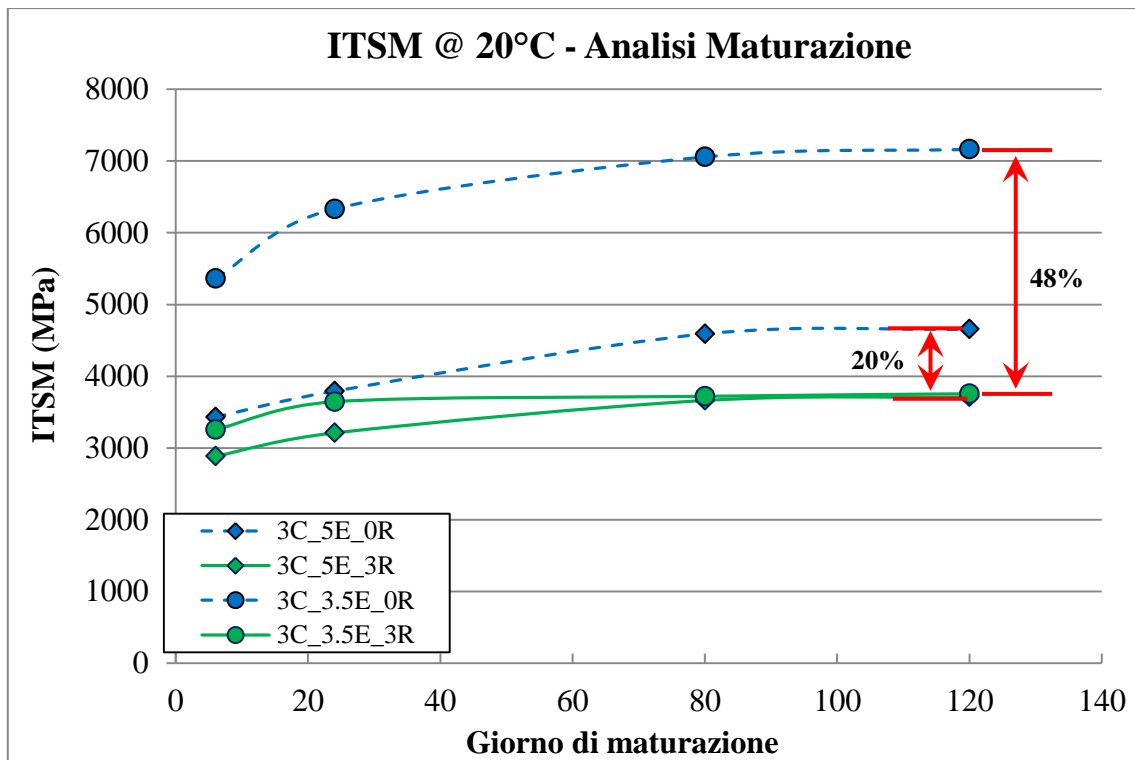


Figura 5. 60: Andamento del modulo di rigidezza ITSM nel tempo per miscele con 3% di Cemento

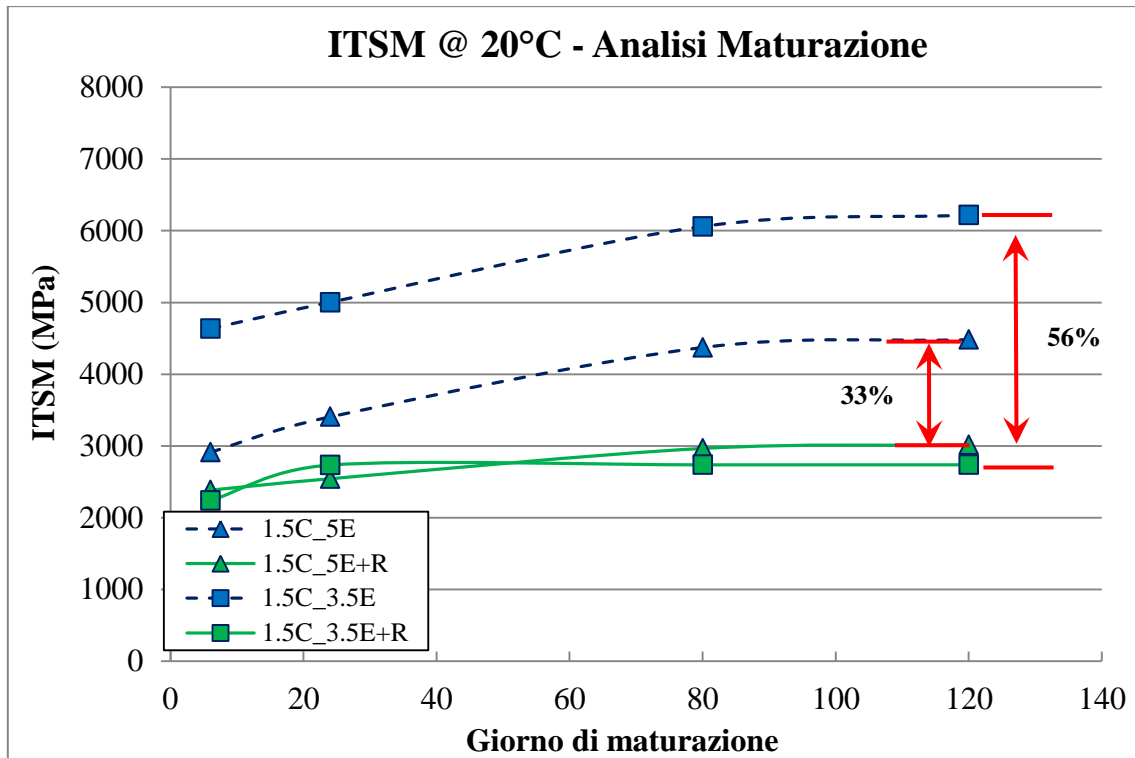


Figura 5. 61: Andamento del modulo di rigidezza ITSM nel tempo per miscele con 1.5% di Cemento

Analizzando i valori in termini dei tempi di maturazione, i grafici evidenziano come i provini con polverino di gomma, avendo linee di tendenza più orizzontali, tendano a raggiungere più velocemente il valore massimo di ITSM. Lo stesso fenomeno, può essere desunto anche dalla Figura 5. 59, infatti calcolando per le diverse miscele con polverino, l'incremento di ITSM in seguito a maturazione dai 6 gg. ai 120 risulta pari a:

+15 % per miscela 3.0C_3.5E

+22 % per miscela 1.5C_3.5E

Di questo incremento però solamente una piccola parte si sviluppa negli ultimi 96 gg. di maturazione, l'incremento % nel periodo di maturazione dai 24 gg. ai 120, vale 3% per la prima miscela e 0.1% per la seconda.

Una ulteriore considerazione sui valori dei moduli di rigidezza delle miscele con CCR al termine della maturazione può essere fatto studiando l'effetto dell'emulsione bituminosa. Dai grafici si vede come nelle miscele senza polverino, l'aggiunta di

Emulsione Bituminosa riduca notevolmente il valore di ITSM al termine della maturazione. Questo non avviene nelle miscele con CCR per le quali i valori di ITSM a 120 gg. tendono a coincidere per le miscele con 3% di cemento, mentre, in quelle con solo l'1.5% di cemento l'aggiunta di emulsione aumenta il valore di ITSM. Questa inversione di tendenza (Figura 5. 61) dimostra l'affinità tra emulsione e CCR che per bassi dosaggi di cemento, prevale sul legame cemento CCR.

5.5.3.3 RISULTATI ED ANALISI SULLA SENSIBILITÀ TERMICA DEI MATERIALI

Nella Tabella 5. 12 vengono riportati i moduli ITSM calcolati dopo maturazione di 120 gg. a diverse temperature di prova: 10, 20 e 30 °C.

	10	20	30
	adj ITSM [Mpa]	adj ITSM [Mpa]	adj ITSM [Mpa]
1.5C_5E	6996,5	4481,75	2602,75
1.5C_5E+R	4569	3012,25	1821
3C_5E	6642	4654,75	2641,25
3C_5E+R	5353,75	3710	2244,25
3C_3.5E	10113,5	7163,75	5009,25
3C_3.5E+R	5174,75	3755,75	2482,75
1.5C_3.5E	9035,25	6218,5	4090,5
1.5C_3.5E+R	3899,75	2736,5	1830

Tabella 5. 12: Risultati moduli ITSM dopo 120 gg. alle temperature di 10, 20, 30 °C

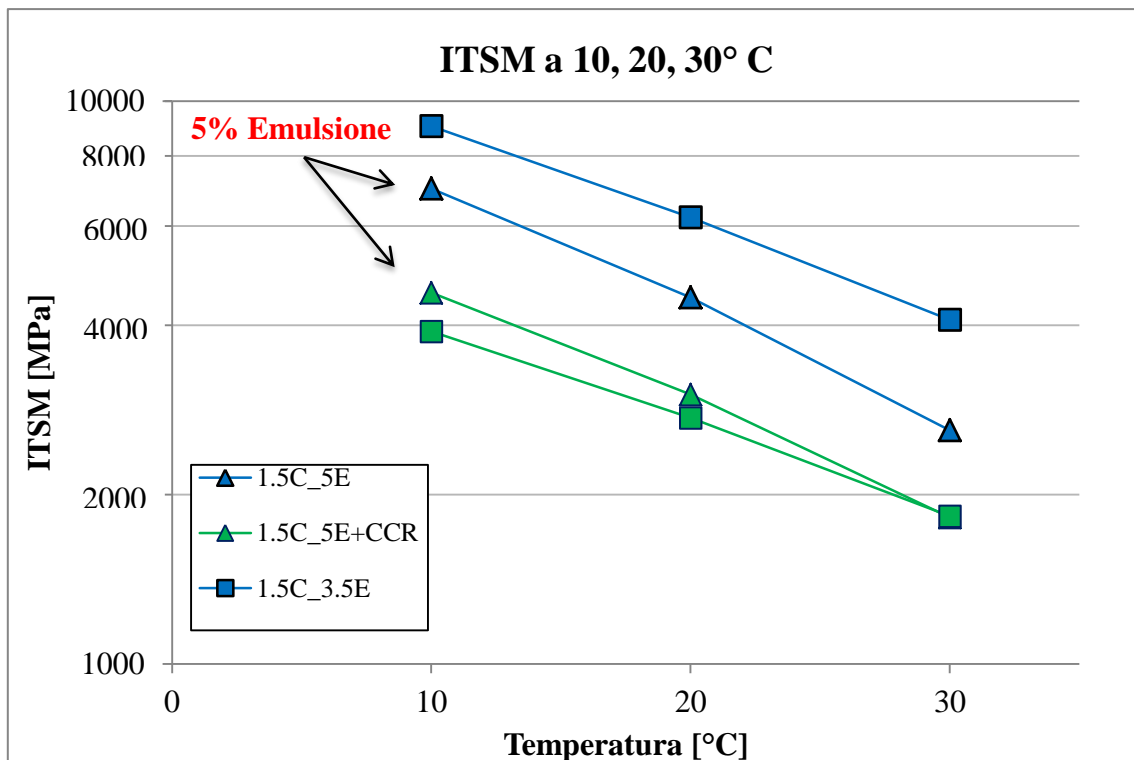


Figura 5. 62: Sensibilità termica con ITSM a 10, 20, 30 °C per miscele con 1.5% di cemento

I valori più alti di modulo ITSM si hanno ovviamente per temperature più basse dove il materiale risulta più rigido, l'effetto di un innalzamento della temperatura, provoca un rammollimento nel materiale che quindi restituisce valori di modulo ITSM inferiori.

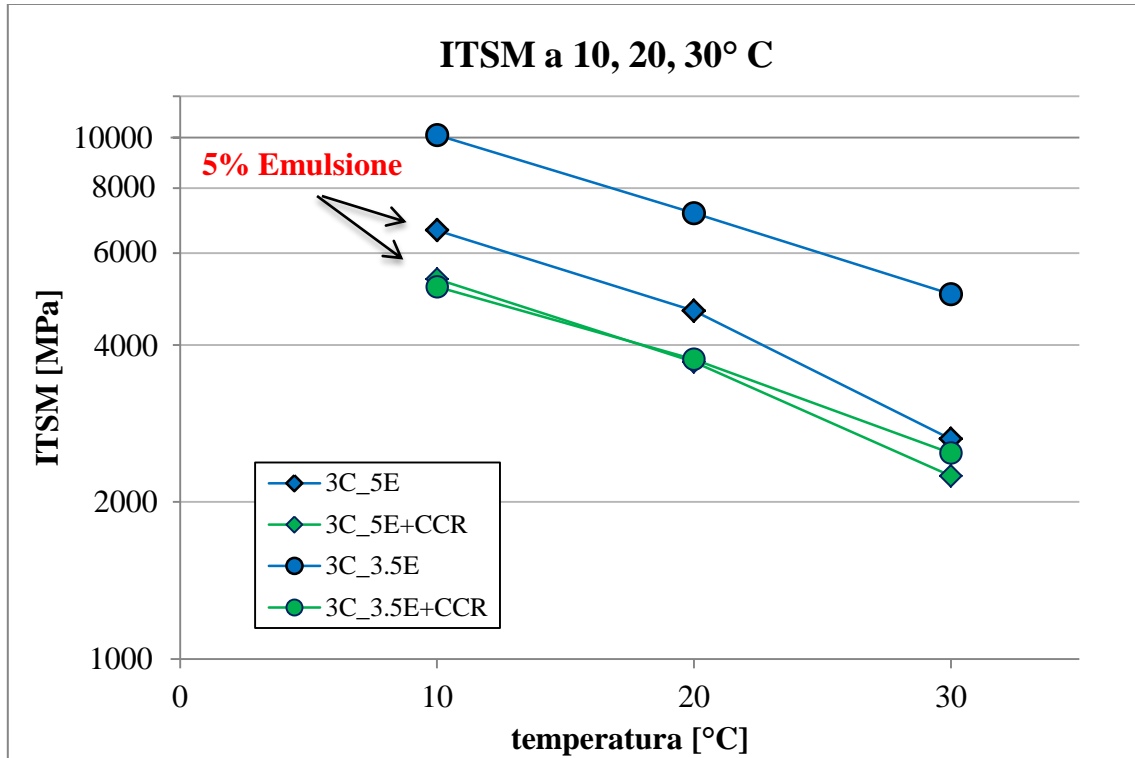


Figura 5. 63: Sensibilità termica con ITSM a 10, 20 , 30 °C per miscele con 3.0% di cemento

I grafici in Figura 5. 62 e Figura 5. 63, mostrano come l'aggiunta di polverino (verde) non influenzi la sensibilità termica del materiale rispetto alla miscela che non lo contiene. Le pendenze delle linee di tendenza, rimangono costanti in seguito all'aggiunta di CCR.

L'inserimento del polverino genera in tutte le miscele una diminuzione dei valori di ITSM. Il gap tra i due moduli di rigidità si mantiene pressoché costante al variare delle temperature. Per miscele con 1.5% di cemento, la riduzione tra i moduli si aggira attorno al 33% e 56% rispettivamente per miscele con il 5% di emulsione e il 3.5%. Per miscele con il 3% di cemento invece il divario tra i valori di ITSM si riduce mostrando una perdita del 18% e 49% rispettivamente per le miscele con il 5% e il 3.5% di emulsione.

Il cemento come l'emulsione, a differenza del polverino di gomma, influenzano la sensibilità termica del materiale.

Il cemento la riduce leggermente, infatti a parità di emulsione le linee di tendenza delle miscele con più cemento risultano meno inclinate quindi la differenza di ITSM al variare della temperatura risulta inferiore.

Inoltre anche in questi grafici è evidente come l'utilizzo di un maggior dosaggio di cemento faccia aumentare i valori assoluti dei moduli di rigidezza.

L'emulsione invece ha un duplice comportamento, nelle miscele senza CCR il passaggio da un 3.5% ad un 5%, provoca una notevole perdita di rigidezza (traslazione verso il basso delle linee di tendenza blu), mentre per le miscele con Polverino di Gomma questo fenomeno si riduce fino quasi ad annullarsi.

Un ulteriore aspetto imputabile all'Emulsione, è la maggior sensibilità termica dei materiali alle alte Temperature. Mentre tra i 10°C e i 20°C il comportamento delle miscele al variare dei dosaggi di emulsione non cambia, è evidente come questo non sia vero per valori di temperatura superiori ai 20°C. Questo fatto si traduce in un incremento delle pendenze nelle linee di tendenza sul grafico ITSM – Temperatura in seguito al superamento dei 20°C.

5.5.4 CONCLUSIONI SUI RISULTATI

La valutazione dei moduli di rigidezza ITSM, ha evidenziato come l'introduzione del polverino di gomma nelle miscele, riduca i valori di ITSM e quindi le rigidezze delle miscele. Questa riduzione è maggiore nelle miscele con l'1.5% di cemento e, a parità di cemento, è maggiore nelle miscele con una minore percentuale di emulsione bituminosa.

L'incremento di cemento nelle miscele invece come logico rende il materiale più rigido.

Analizzando l'effetto dell'emulsione si è riscontrato come l'incremento di quest'ultima nelle miscele senza polverino riduca notevolmente le rigidezze del materiale, mentre in quelle con polverino questa riduzione cala fino a trasformarsi in un aumento di ITSM per miscele con CCR povere di cemento (1.5% Cemento).

Dallo studio sulla maturazione dei materiali, emerge come i materiali con polverino tendano a raggiungere più velocemente il massimo valore di modulo di rigidezza rispetto alle miscele senza CCR.

L'analisi sulla sensibilità termica delle diverse miscele nei confronti dei valori di ITSM ha evidenziato come l'aggiunta di polverino di gomma all'interno dei materiali, riduca i valori assoluti di ITSM, ma senza influenzare la sensibilità termica dei campioni.

Al tempo stesso invece l'emulsione e il cemento hanno mostrato come, all'aumentare dei dosaggi, la prima renda il materiale più sensibile alle alte temperature mentre il cemento riduce leggermente la sensibilità termica delle miscele.

5.6 FASE 5: TEST ITFT PER LA DETERMINAZIONE DELLE LEGGI DI FATICA DEL MATERIALE

5.6.1 INTRODUZIONE ED OBIETTIVI

Dopo aver valutato la resistenza a trazione indiretta ed i moduli di rigidezza resta da esaminare un'altra fondamentale proprietà che incide in maniera determinata sulla vita utile di una sovrastruttura stradale. Questa proprietà è la resistenza a fatica che verrà studiata mediante il test di fatica a trazione indiretta o ITFT (indirect tensile fatigue test). Durante la prova tutti i provini verranno portati a rottura attraverso l'ausilio di una serie di impulsi aventi carico costante e definito preliminarmente. La norma di riferimento per il corretto svolgimento del test è la UNI EN 12697-24 sulla resistenza a fatica; la macchina è la stessa usata per la determinazione dei moduli cioè il MatTA.

Il test verrà effettuato ad una temperatura di 20°C, su ognuna delle 4 miscele considerate, verranno eseguite tre prove con tensioni diverse scelte opportunamente per ottenere una deformazione iniziale di 175, 140, 110 µε. La singola prova inoltre verrà ripetuta su tre provini differenti in modo da ottenere un valore più attendibile del risultato.

L'obiettivo è confrontare le resistenze a fatica dei diversi materiali per cercare di valutare se l'aggiunta di polverino di gomma, possa incrementare la durata nel tempo della miscela rispetto alla corrispondente miscela senza CCR.

5.6.2 I PROVINI SOTTOPOSTI A ITFT

I provini sottoposti a test ITFT, sono gli stessi utilizzati per la determinazione dei moduli di rigidezza ITSM. I 48 campioni utilizzati nei test ITSM e ITFT, sono stati realizzati in un secondo momento rispetto a quelli utilizzati per le prove di trazione indiretta ITS.

Il confezionamento, è avvenuto mediante pressa giratoria in accordo con quanto descritto al paragrafo 05.3.1.

In seguito a maturazione, i provini cilindrici, sono stati sottoposti a taglio mediante mola circolare.

Questo ha permesso di ottenere dallo stesso provino 2 nuovi campioni che rispettassero le dimensioni imposte dalla normativa. In tal senso, la UNI EN 12697-24, stabilisce che per provini con aggregato di dimensione massima 38 mm, i provini da sottoporre a test ITFT debbano avere un diametro di 150 mm e un'altezza di almeno 60 mm.



Figura 5. 64: Taglio dei Provini mediante Mola Circolare

Da osservare che i provini prima di essere sottoposti a taglio, sono stati avvolti in uno strato di nastro isolante. Questo accorgimento ha permesso di ottenere un taglio più pulito ed evitare che parte degli aggregati potesse staccarsi dal provino compromettendone l'integrità e la forma.



Figura 5. 65: Esempio di provino prima del Taglio (sx) e dopo il taglio (dx)

A seguito del taglio, sono stati ottenuti complessivamente 96 provini sui quali si svolgeranno i test di Fatica.

5.6.3 LA FATICA

5.6.3.1 DEFINIZIONE

Gli strati bituminosi costituenti una pavimentazione stradale sono soggetti all'applicazione di un carico di breve durata ogni qualvolta sul piano viabile transita un veicolo. Nel tempo il susseguirsi e l'entità dei carichi da traffico è variabile in funzione delle frequenze di transito e delle tipologie di mezzi transitanti. Si ritiene che ad ogni passaggio corrisponda uno scadimento delle proprietà meccaniche del materiale di strato associato alla formazione di micro-lesioni nel volume dello stesso (Figura 5. 1), fino alla comparsa di fessure visibili anche ad occhio nudo. L'accumulo del danno porta, nel tempo, al degrado della sovrastruttura ed alla sua perdita di funzionalità. Tale tipo di danneggiamento si manifesta usualmente sotto forma di fessurazioni degli strati bituminosi e prende il nome di "fessurazione per fatica" (fatigue cracking).

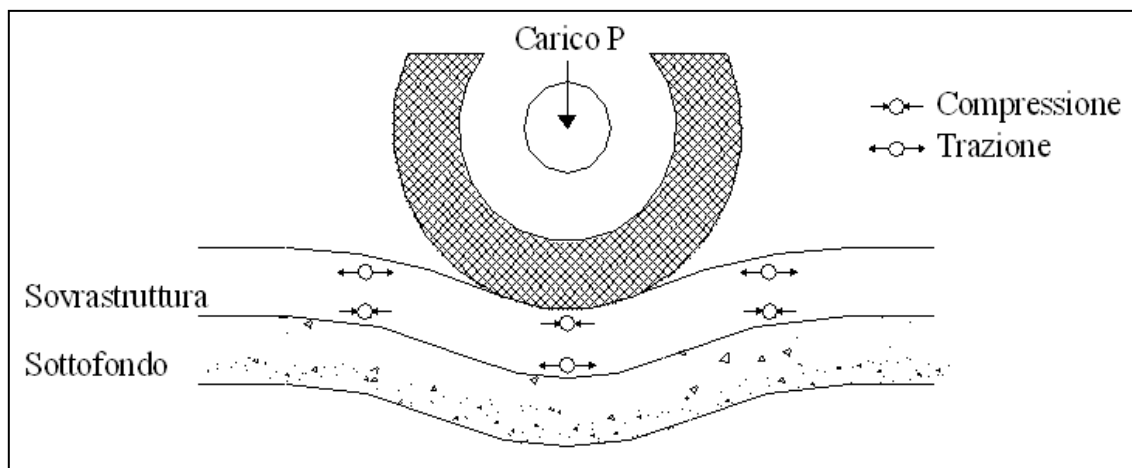


Figura 5. 66: Stati tensionali indotti dal transito di un veicolo

L'innescò della fessura, provocata da tale fenomeno, avviene alla base degli strati legati e progressivamente si propaga verso l'alto, manifestandosi macroscopicamente sulla superficie della pavimentazione con una diffusa fessurazione a ragnatela che comporta il danneggiamento irreversibile della stessa.

Analizzare il comportamento a fatica è indispensabile almeno per due motivi: per interpretare al meglio il comportamento nel tempo delle pavimentazioni bituminose e per riuscire a progettare la struttura garantendone una maggior vita utile.

La vita utile è definita come il numero di ripetizioni di carico che portano alla rottura del conglomerato.

La fatica dunque rappresenta una situazione da verificare e soddisfare nell'ambito dei vari metodi di progettazione delle pavimentazioni stradali.

5.6.3.2 SVILUPPO DEL DANNO PER FATICA IN SITO

Le pavimentazioni stradali sono soggette nel corso della loro vita di esercizio a sollecitazioni meccaniche ripetute, a variazioni cicliche di temperatura nonché a fenomeni usuranti come le precipitazioni ed i cicli di gelo e disgelo.

La ciclicità di queste sollecitazioni, instaura nella pavimentazione un fenomeno di degradamento, che si manifesta con la comparsa di fratture o fessurazioni evidenti in superficie; tuttavia, mentre i fenomeni atmosferici ed i cicli termici danneggiano la pavimentazione in senso fisico, il continuo passaggio degli automezzi induce sollecitazioni meccaniche continue che interessano anche gli strati più profondi.

Se la pavimentazione è soggetta a cicli di carico di entità inferiore a quelli necessari a causarne la rottura, si dice che essa è soggetta a *fatica*. Il danneggiamento per fatica è un fenomeno che si sviluppa nel tempo, in seguito ad un elevato numero di ripetizioni di carico che portano a rottura la pavimentazione.

Tra le forme di fessurazione per fatica più comuni, si possono indicare quelle generate alla base dei conglomerati bituminosi che si propagano verso la superficie e quelle che, generatesi in superficie, tendono ad insinuarsi verso il basso nello spessore bituminoso.

Le prime, in genere identificate col termine inglese *bottom-up*, nascono per effetto delle ripetute sollecitazioni flessionali cui è soggetta la sovrastruttura stradale, che causano il superamento del limite di deformazione per trazione sopportabile dal conglomerato; ciò può avvenire per cattiva progettazione (spessori troppo contenuti, superamento del campo tensionale ammissibile) o per infiltrazioni che rendono difficoltosa l'adesione tra gli strati del pacchetto stradale (lo strato superficiale si deforma come un corpo a sé stante e non collabora con quelli sottostanti).

Nel secondo caso invece, le fessure cosiddette *top-down* nascono in superficie per effetto delle azioni tangenziali cui è soggetto il piano viabile, ad esempio quelle indotte dagli sforzi di trazione in curva e di frenatura: queste sollecitazioni agiscono sullo strato superficiale del manto d'usura, che risulta esposto ai fenomeni atmosferici ed è quindi soggetto ad un danneggiamento chimico-fisico; il materiale maggiormente esposto perde le proprie caratteristiche meccanico-prestazionali, la pavimentazione risulta caratterizzata da una rigidità superficiale inferiore a quella che si ha a pochi centimetri di profondità, e quindi manifesta crepe in superficie che si propagano in profondità.



Figura 5. 67: Propagazione delle fessure nelle pavimentazioni stradali

Lo studio delle prestazioni a fatica, permette di impiegare i materiali stradali al meglio delle loro capacità, al fine di prostrarre nel tempo la durata utile delle pavimentazioni stradali.

5.6.3.3 PROVA PER LA DETERMINAZIONE DELLA VITA A FATICA A TRAZIONE INDIRETTA

La prova di trazione indiretta di fatica o (ITFT) è solitamente condotta sottoponendo i campioni cilindrici a carichi ripetuti, in genere della stessa entità, nella direzione del diametro verticale, e registrando il numero di applicazioni necessario per portarlo a rottura. Tale configurazione di carico sviluppa all'interno del provino una sollecitazione di trazione ragionevolmente uniforme lungo il piano diametrale verticale, con direzione perpendicolare a quella del carico applicato, responsabile della rottura stessa.

In laboratorio, la rottura è definita sulla base di uno specifico criterio scelto in base al tipo ed alle condizioni di prova.

Essa è spesso considerata come coincidente con il momento in cui il materiale che costituisce il provino, non è più in grado di rispondere alle sollecitazioni in maniera adeguata. I criteri di rottura che scandiscono i tempi di durata della prova possono essere definiti in vario modo. A partire dalla rottura completa del provino per la quale il test non può più fisicamente essere condotto, passando per il punto in cui si registra la prima fessurazione, fino al momento in cui la rigidità, od un'altra proprietà del campione, si è ridotta (o è aumentata) di un certo quantitativo rispetto al suo valore iniziale. La scelta del criterio di rottura è, come detto, legata alla metodologia e configurazione di prova adottata e, pertanto, un commento ingegneristico dei risultati di prove non può prescindere dalla sua conoscenza.

L'apparecchiatura impiegata è il MATTA, utilizzata per la determinazione delle rigidità ma in una configurazione differente, e saranno gli stessi sistemi pneumatici ed idraulici ad applicare i carichi. L'annesso E della norma UNI EN 12697-24, che si riferisce all'ITFT per provini cilindrici, definisce i passaggi per una corretta esecuzione della prova,

la procedura di allestimento del provino, il tipo di carico e le equazioni per la determinazione della sollecitazione di trazione e deformazione corrispondente.

Al centro del provino le sollecitazioni massime di trazione e compressione (Figura 5. 68) si calcolano, utilizzando la teoria dell'elasticità lineare, con le formule seguenti (1) :

$$1) \quad \sigma_t = \frac{2 * P}{\pi * a * h} \left(\text{sen}2\alpha - \frac{a}{2 * R} \right)$$

$$\sigma_t = \frac{-6 * P}{\pi * a * h} \left(\text{sen}2\alpha - \frac{a}{2 * R} \right)$$

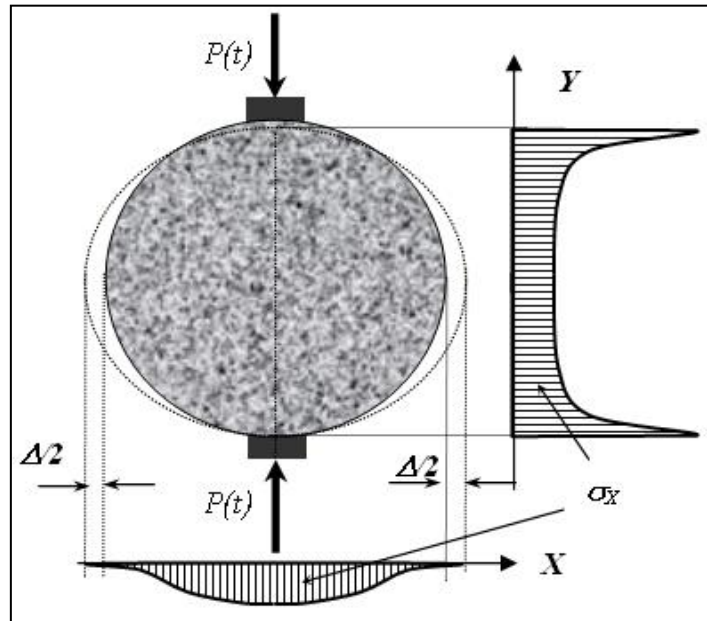


Figura 5. 68: Stato di sollecitazione biassiale nella configurazione di T.I.

dove P è il carico verticale applicato
a è lo spessore della striscia di carico
R ed h sono rispettivamente il raggio del campione e l'altezza del provino
2α è l'angolo al centro sotteso dalla larghezza della striscia di carico.

Al centro del provino la compressione è quindi 3 volte superiore alla trazione orizzontale.

La massima deformazione orizzontale sarà:

$$2) \quad \varepsilon_t = \frac{\sigma_t * (1+3*\nu)}{E}$$

dove E è il modulo di rigidezza

ν è il coefficiente di Poisson.

Alla base delle prove di fatica è richiesta quindi la conoscenza della rigidezza della miscela. Tale valore insieme allo stato tensionale del provino sono indispensabili per calcolare la deformazione ε_t , che si utilizza in ordinata per tracciare le curve di fatica alla Wöhler (Figura 5. 69). Queste esprimono l'ampiezza di sollecitazione (tensione o deformazione) applicata in funzione del numero di cicli ed è generalmente rappresentata da una retta sul piano bi-logaritmico. Il suo andamento è descritto da una relazione del tipo:

$$N = K * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^n \quad \text{o} \quad \ln(N) = k + n * \ln(\varepsilon_t)$$

N è il numero di applicazioni di carico per soddisfare il criterio di rottura, n e K sono dei coefficienti di regressione legati alle caratteristiche del materiale ed alla metodologia e condizioni di prova.

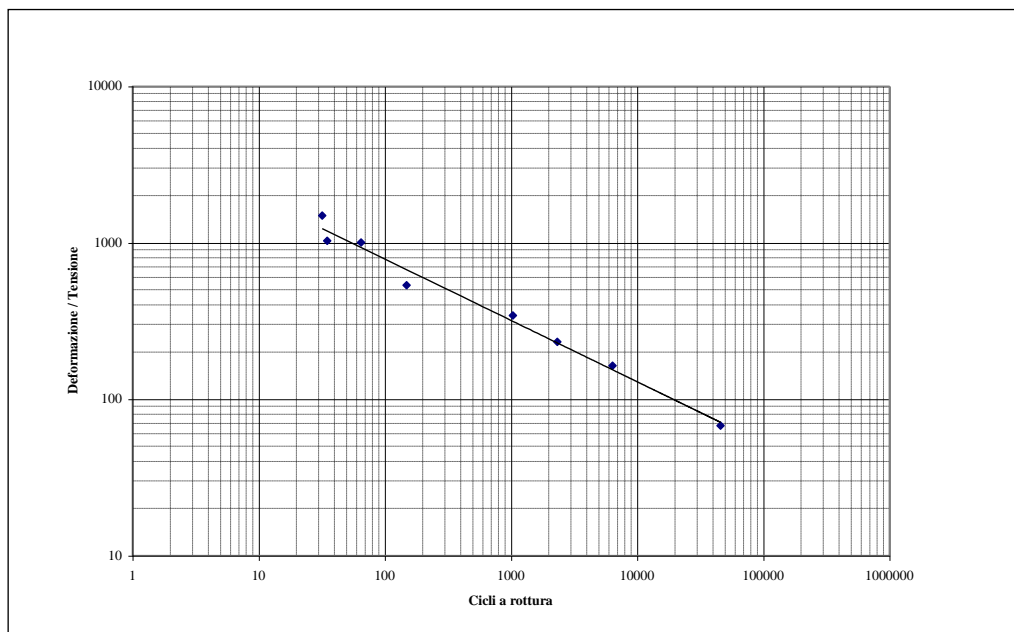


Figura 5. 69: Curva di fatica alla Wöhler

5.6.3.4 TIPO E MODALITÀ DI CARICO

Utilizzando la stessa apparecchiatura della prova ITSM anche la tipologia del carico esercitato sarà lo stesso.

Lo schema di carico da impiegare in una prova a fatica può variare secondo leggi differenti. Nella Figura 5. 70 sono rappresentati i vari tipi di forme di carico, che possono influenzare la vita a fatica, generalmente impiegati per questo tipo di prove.

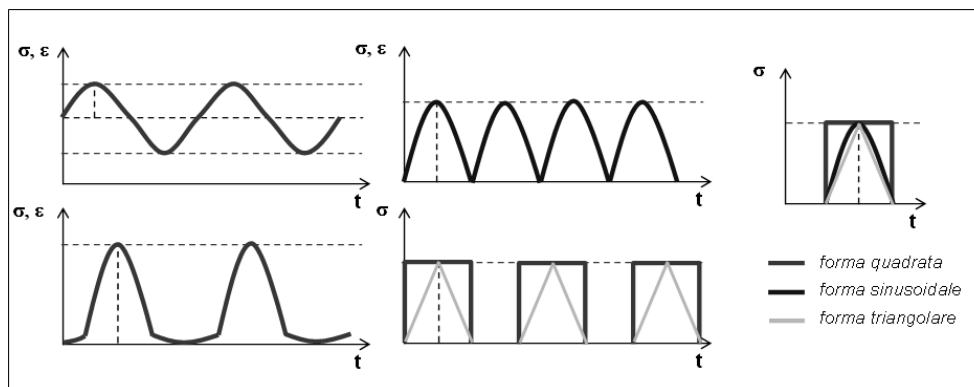


Figura 5. 70: Tipologie di segnali di carico

In generale, forze o spostamenti e quindi tensioni o deformazioni possono essere imposte al provino di conglomerato bituminoso in vario modo, il più comune dei quali è l'onda sinusoidale o semi-sinusoidale. Vi sono anche prove per cui l'applicazione è impulsiva o intermittente con forme differenti della singola applicazione, variabili, soprattutto, in ragione delle potenzialità dello strumento. In letteratura, alla forma dell'onda di carico è stata attribuita notevole importanza essendo variabile con essa l'energia immessa nel sistema per ogni ciclo di applicazione. A parità di ampiezza di caricamento e di tempo di carico, onde con area sottesa maggiore somministrano maggior energia al provino riducendone la vita a fatica (N_f).

Oltre alla tipologia di carico, avendo come obiettivo il raggiungimento della rottura, si possono distinguere due tipologie di prova in funzione della modalità di carico:

- *a sforzo controllato*; quando il carico ha la natura di una tensione anche variabile ma di ampiezza costante (Figura 5. 71),

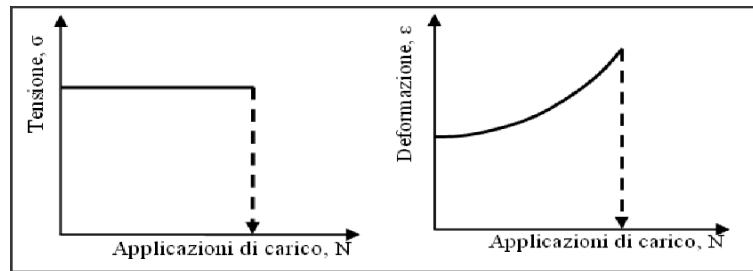


Figura 5. 71: : comportamento a fatica di una miscela a tensione controllata : $MF = 1$

- a *deformazione controllata*; quando il caricamento ha la forma di una deformazione applicata o di un'inflexione di ampiezza costante (Figura 5. 72),

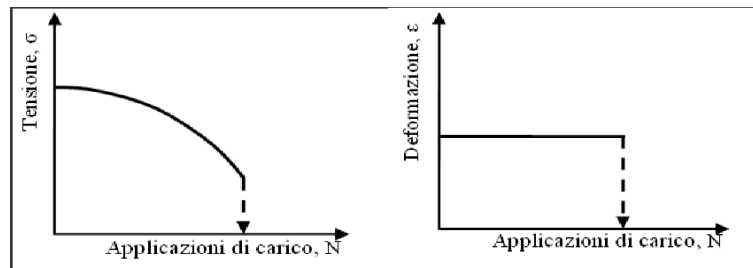


Figura 5. 72:: comportamento a fatica di una miscela a deformazione controllata: $MF = 1$

Nelle prove a tensione controllata (controlled stress) la deformazione aumenterà gradualmente fino al collasso in quanto, al progredire della prova, diminuisce la rigidità del campione aumentando, quindi, la deformazione prodotta dallo stesso carico applicato e mantenuto costante.

Nelle prove a deformazione controllata (controlled strain), lo sforzo o il carico diminuiranno all'aumentare del numero di cicli poiché il provino gradualmente si danneggerà, richiedendo dunque meno carico per produrre la stessa deformazione. I risultati ottenuti sulla stessa miscela bituminosa con una prova a sforzo o a deformazione controllata sono notevolmente diversi e l'influenza del tipo di prova è evidente se, considerando provini identici testati nei due metodi, si considera l'effetto della rigidità sulla durata a fatica.

Se i campioni sono sottoposti ad uno stato di sforzo controllato, ad esempio con una sollecitazione variabile con legge sinusoidale e di ampiezza costante, allora l'aumento di rigidità del materiale comporta un incremento della resistenza a fatica. Se gli stessi campioni vengono testati con un dispositivo che induce deformazioni applicate in modo variabile ma di ampiezza costante, allora con rigidità più bassa mostrano un andamento

inverso rispetto a quello in regime di sforzo controllato cioè vite a fatica maggiori associate a rigidzze minori.

Il differente comportamento nei due tipi di prova può essere rimandato a come si sviluppa la fessurazione che risulta diverso nel caso di sforzo o a deformazione controllata. Il collasso inizia con la formazione di lesioni là dove si viene a creare una concentrazione di sforzi e prosegue quando tali fessure si propagano nel materiale finché avviene la frattura. Si possono quindi individuare due fasi distinte, una di innesco della fessura e una di propagazione. La propagazione di una fessura dipende dalla concentrazione di sforzi alla sua sommità. In una prova a sforzo controllato la propagazione è estremamente rapida, dunque il provino perviene alla completa frattura in un tempo relativamente breve che decreta la fine del test. Nelle prove a deformazione controllata invece la fessurazione comporta un decremento degli sforzi poiché la rigidzza del provino gradualmente diminuisce. La conseguenza è un lungo periodo di propagazione, sempre più lungo alle basse rigidzze.

5.6.4 ESECUZIONE DELLA PROVA

5.6.4.1 SCELTA DELLA MODALITÀ DI CARICO

Alla luce del fatto che il modo di carico influenza significativamente i risultati delle prove a fatica, diviene indispensabile chiedersi quali delle due modalità sia preferibile.

Con questa versione del MatTA è possibile svolgere solamente quelle a tensione controllata, visto che non è disponibile un sistema di misura della deformazione orizzontale durante la prova, resta comunque attuabile la configurazione di prova secondo norma (UNI EN 12697-24) essendo definita la rottura come il collasso completo del provino. Da alcune recenti sperimentazioni, comunque, è risultato che le condizioni di carico in controllo di tensione sono più indicate per materiali bituminosi impiegati in strati di spessore superiore ai 15 cm. Visto che lo studio è volto a definire una miscela da impiegare in uno strato profondo della sovrastruttura stradale, che ha uno spessore maggiore di 15 cm, l'utilizzo del carico a tensione controllata costituisce anche la soluzione teorica suggerita. Per investigare su un più ampio range tensionale, la scelta del carico, non sarà costante per tutti i provini, ma verranno adottate sollecitazioni variabili.

5.6.4.2 SCELTA DEL CRITERIO DI ROTTURA

Per definire la rottura dei provini oltre all'approccio tradizionale, definito sulla base della normativa di riferimento, in cui N è il numero totale di applicazioni del carico che causa una rottura completa del provino, è stato seguito un approccio analogo a quello energetico, trattato da A.C.Collop e J.Read, attraverso il quale si valuta una relazione con l'energia dissipata durante una prova di fatica in laboratorio. Diversi autori avanzano l'ipotesi che esista una unica relazione tra la vita a fatica di un provino bituminoso e l'energia totale dissipata durante il test fino alla rottura. Durante la sollecitazione si può, in effetti, riscontrare una dissipazione energetica dovuta al comportamento visco-elastico del materiale. La dissipazione di questa energia è in gran parte associata alla deformazione viscosa del materiale che la trasforma in calore, ma anche alla formazione di micro-lesioni nel materiale che condurranno alla rottura. Sulla base di tale criterio A.C.Collop e J.Read nel 1997 hanno proposto una semplificazione. Essi hanno dimostrato come l'andamento dell'*energy ratio*, rapporto tra l'energia dissipata al primo ciclo e quella dissipata al ciclo N , in funzione del numero di cicli di carico possa essere agevolmente assimilato a quello del rapporto $N/\Delta s$ tra il numero del ciclo di carico n -esimo ed il corrispondente abbassamento assiale del campione.

Dalla Figura 5. 73 si può vedere come i due criteri non convergono in una definizione univoca del numero di cicli del punto di rottura, ma individuano due distinti numeri di colpi (N) che soddisfano i due criteri di rottura.

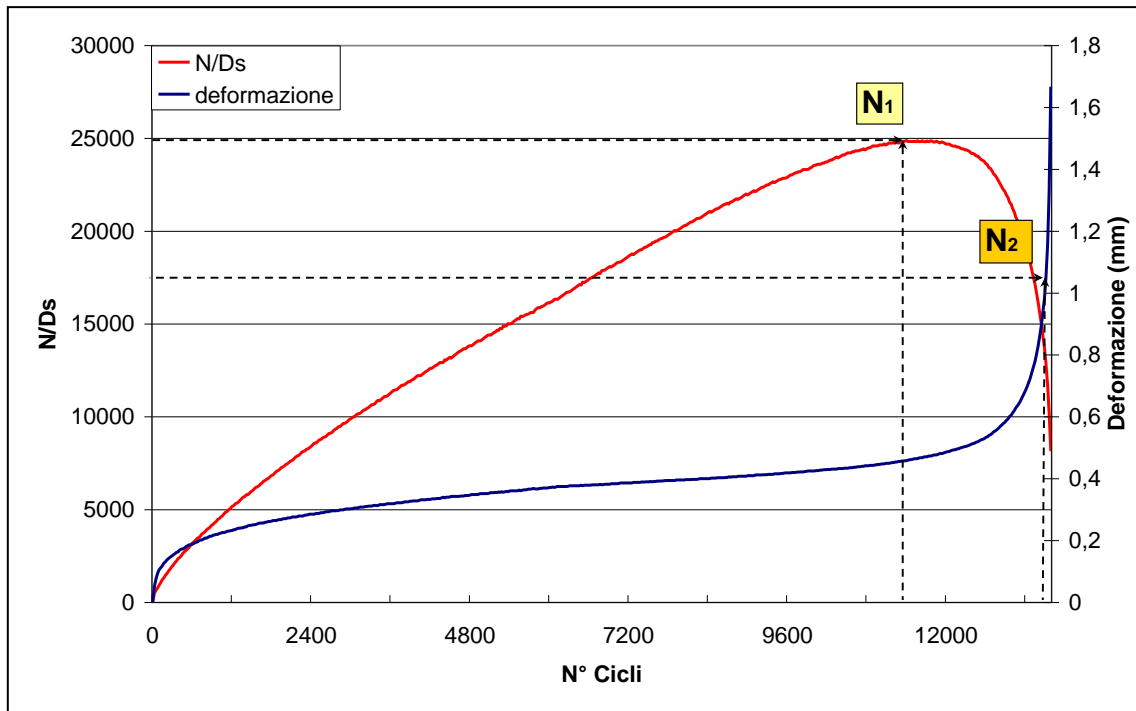


Figura 5. 73: Andamento dell'energia dissipata in funzione del numero di cicli

La rottura fisica del provino avviene sempre con un numero di cicli superiore a quello necessario per definire la rottura con l'approccio energetico. Tale risultato semplifica radicalmente la determinazione del punto di innesco della fessurazione soprattutto nel caso di configurazioni di prova a trazione indiretta in cui non sia prevista la misurazione delle deformazioni orizzontali del provino, ma soltanto lo spostamento verticale del coltello superiore di carico.

5.6.4.3 ALLESTIMENTO DEL PROVINO E CONFIGURAZIONE SOFTWARE

L'esecuzione delle prove di fatica e la preparazione dei provini è relativamente semplice.

Come per le prove di modulo, dopo aver condizionato il provino alla temperatura di prova (20°C), esso viene posizionato in un telaio metallico tra le due barre di carico e successivamente sotto l'attuatore. Per controllare la deformazione verticale vengono utilizzati due LVDT opportunamente calibrati e collocati sopra la barra di carico superiore. La Figura 5. 74 mostra l'operazione completata in cui il provino si trova contrastato tra le due barre di carico in maniera simmetrica.

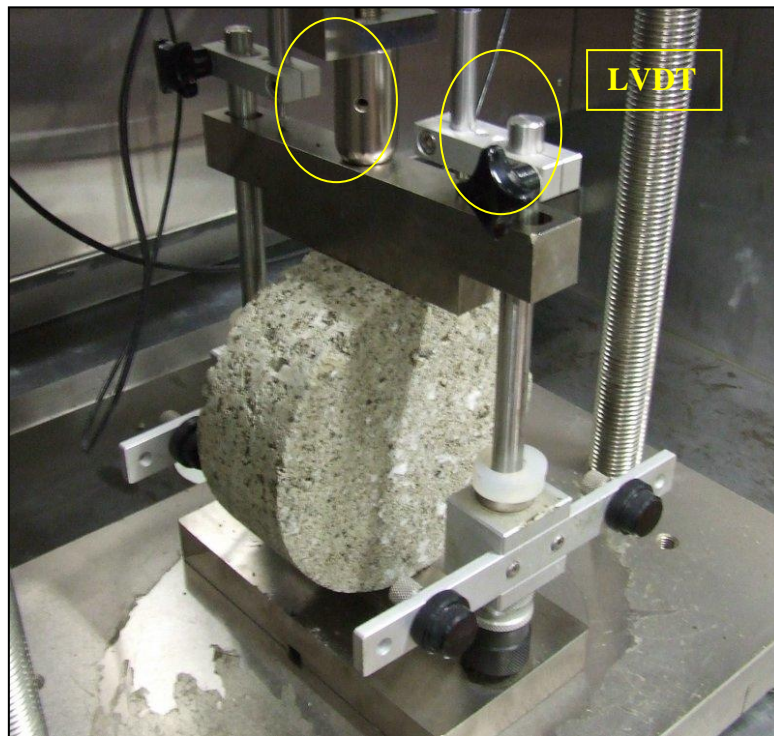


Figura 5. 74: Foto di un provino sottoposto a ITFT

La macchina è controllata da un software, nel quale devono essere inseriti i parametri sul carico e sulla forma dei provini, che rende la procedura automatica. Rispettando la normativa di riferimento (UNI EN 12697-24), in Tabella 5. 13 è indicata la configurazione della prova:

GEOMETRIA PROVINI	<i>Altezza provino (mm)</i>	59
	<i>Diametro provino (mm)</i>	150
IMPOSTAZIONI IMPULSO	<i>Pulse period (ms)</i>	1500
	<i>Rise time (ms)</i>	130
	<i>Load tensile stress (kPa)</i>	200-700
	<i>Max deform. verticale (mm)</i>	9

Tabella 5. 13: Parametri di configurazione del test

Il valore della tensione viene scelto dall'operatore cercando di non adottare tensioni troppo elevate per non raggiungere troppo velocemente il collasso.

Sul file di output vengono registrati, oltre i parametri inseriti, il grafico della deformazione in funzione del numero di cicli, cioè numero di cicli e variazione delle deformazioni permanenti. La prova termina al raggiungimento della rottura fisica del provino o della deformazione verticale massima.

5.6.5 RISULTATI DELLA PROVA ITFT

La prova come descritto in precedenza, è avvenuta sottoponendo i campioni ad un carico ciclico a tensione controllata.

Noti i valori dei moduli ITSM, è stato possibile calcolare i valori delle tensioni da applicare ai singoli campioni, fissata la deformazione iniziale ricercata, mediante la relazione:

$$\sigma_t = \frac{\varepsilon_t * E}{(1 + 3 * \nu)}$$

- dove E è il modulo di rigidezza
 ν è il coefficiente di Poisson assunto pari a 0.35
 ε_t è la deformazione orizzontale ricercata
 σ_t è la tensione da applicare al provino per ottenere una deformazione orizzontale ε_t

Nella seguente tabella si riportano a titolo esplicativo, per ciascun provino della miscela composta da 3.0% di Cemento, 3.5% di Emulsione e 3% di CCR sottoposto a test ITFT, le deformazioni orizzontali iniziali ricercate (strain), i valori dei moduli ITSM, le tensioni calcolate mediante la relazione a inizio pagina e il numero di cicli che ha portato a rottura il provino.

nome provino	strain	ITSM [Mpa]	tensione [kPa]	n. cicli
4F_3.0C_3.5E+R A	175	4187	300	781
6F_3.0C_3.5E+R A	169	3631	300	994
6F_3.0C_3.5E+R B	140	3717	254	2971
8F_3.0C_3.5E+R B	140	3829	262	6107
8F_3.0C_3.5E+R A	110	3703	199	26410
9F_3.0C_3.5E+R A	110	3915	210	27148

Tabella 5. 14: Valori di deformazione (strain), modulo di rigidezza ITSM, tensione applicata e numero di cicli a rottura misurato per ciascun provino realizzato mediante miscela al 3.0% Cemento, 3.5% Emulsione e 3.0% CCR

Tabelle analoghe a quella riportata, sono state costruite anche per le rimanenti 7 miscele. I risultati delle prove ITFT sono poi stati riassunti nei grafici in Figura 5. 75 e Figura 5. 76, sull'asse delle ascisse viene specificato il numero di cicli che portato a rottura il provino mentre, sull'asse delle ordinate, sono riportate le deformazioni iniziali a cui è stato sottoposto il provino.

Dall'insieme di questi punti, è stato possibile ricavare per estrapolazione le leggi di fatica alla Wöhler riportate sul grafico per ogni miscela e rappresentate mediante delle rette.

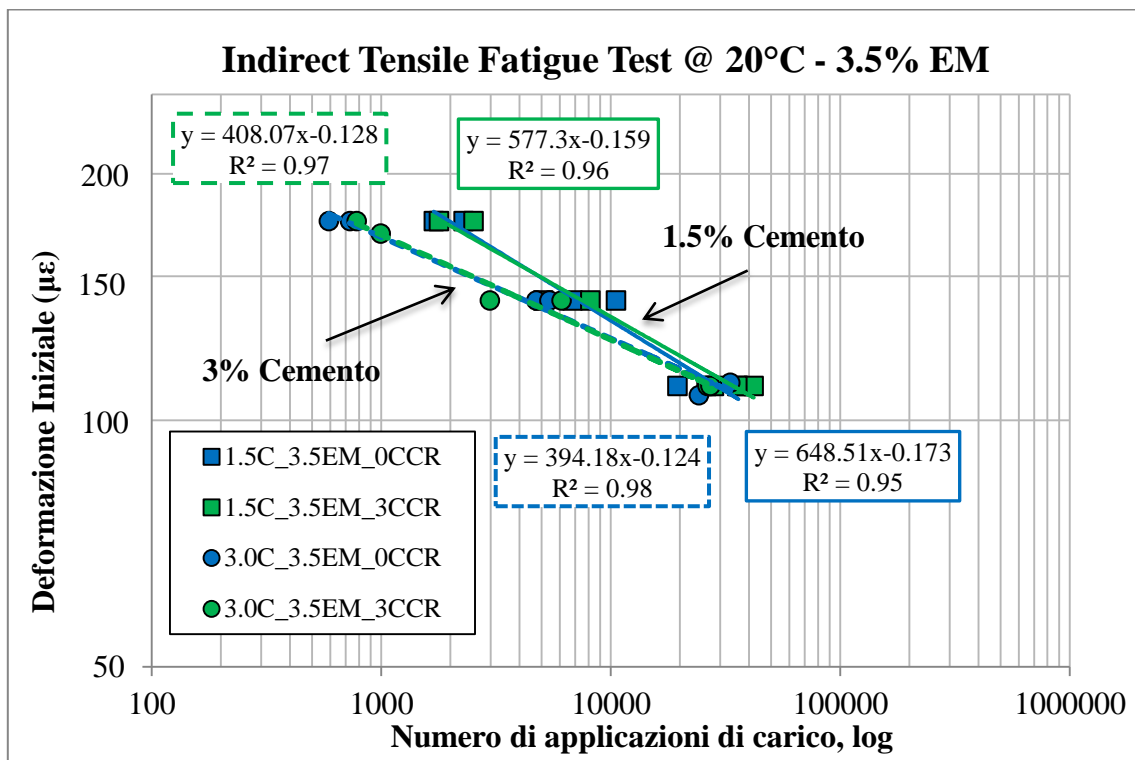


Figura 5. 75: Leggi di fatica alla Wöhler per miscele con 3.5% di Emulsione Bituminosa

Il grafico in Figura 5. 75 evidenzia come per miscele con Emulsione al 3.5%, l'aggiunta di Polverino di Gomma, non contribuisca a migliorare la durata a fatica del materiale. Le rette che rappresentano le leggi di fatica infatti, al variare della percentuale di CCR, rimangono quasi inalterate e si sovrappongono in modo quasi perfetto tra di loro.

Allo stesso tempo si può notare come l'effetto dell'aumento del Cemento per miscele povere di Emulsione Bituminosa, riduca la durata nel tempo dei materiali. Il

motivo di questo fenomeno è imputabile alla maggiore rigidezza dei provini causata dall'aumento delle quantità di Cemento. I materiali ricchi di Cemento, a trazione statica, hanno un campo di deformabilità molto limitato e raggiunto il carico di rottura si rompono e non forniscono più nessuna resistenza meccanica residua (comportamento fragile).

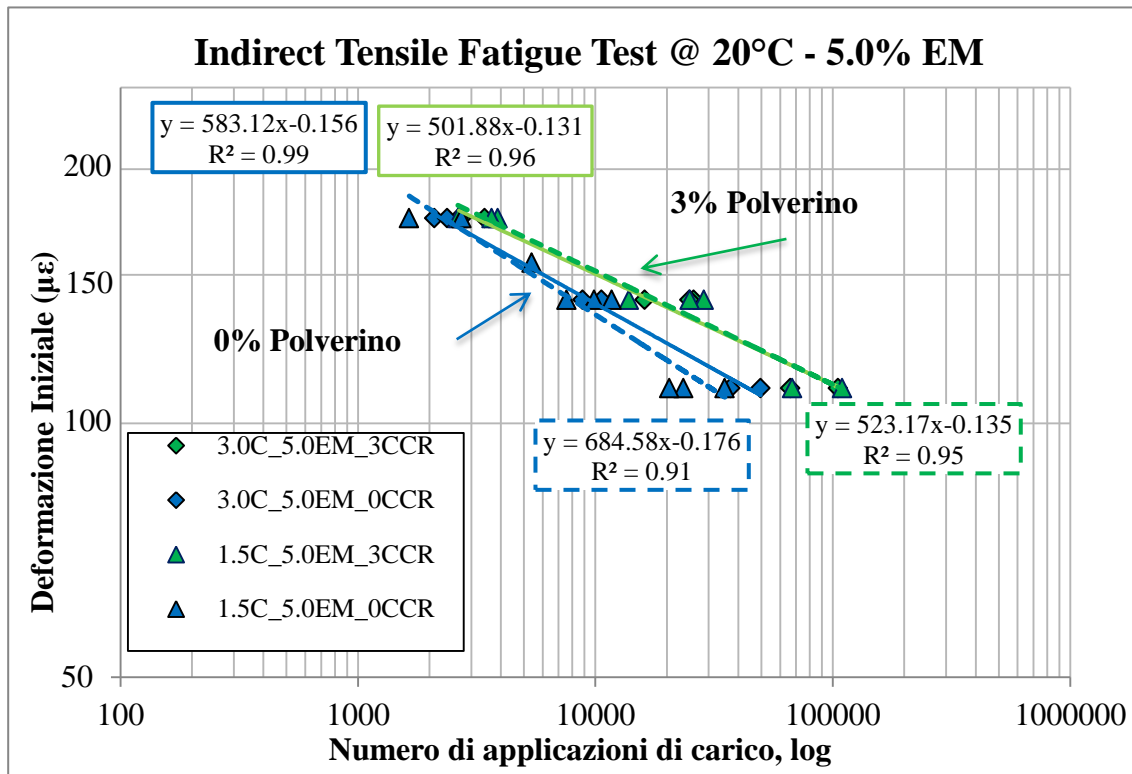


Figura 5. 76: Leggi di fatica alla Wöhler per miscele con 5.0% di Emulsione Bituminosa

Questo secondo grafico, riassume i dati delle miscele contenenti il 5% di emulsione bituminosa. A differenza di quelle con solo il 3.5%, si nota in questo caso un aumento netto della resistenza a fatica dei materiali con Polverino di Gomma. Le curve delle miscele con Polverino (verdi) risultano traslate verso destra e presentano una pendenza minore. Queste due caratteristiche si traducono in un materiale dall'apparenza più duttile che resiste di più a fatica.

Il bitume dell'emulsione contrariamente al cemento, ha un campo di deformazione molto più ampio e una volta superato il carico limite, che definisce il passaggio dal

comportamento elastico a quello viscoso, subisce una progressiva diminuzione delle proprietà continuando a sviluppare delle risorse residue di resistenza.

Nella prova di fatica a trazione indiretta, al raggiungimento di una prefissata deformazione totale incassata dal provino, si perde il contributo dei legami idraulici mentre resistono quelli bituminosi.

Una maggiore dose di emulsione condiziona quindi la durata della fase finale di una prova di fatica aumentando i numeri di colpi necessari per raggiungere il collasso fisico del materiale.

<i>Miscela</i>	<i>Equazione della legge a fatica</i>	<i>Numero di cicli a rottura per $\epsilon_0=100 \mu\epsilon$</i>
3C_3.5EM_0CCR	$y=394.18*x^{-0.124}$	6,37E+04
3C_3.5EM_3CCR	$y=408.07*x^{-0.128}$	5,91E+04
3C_5.0EM_0CCR	$y=583.12*x^{-0.156}$	8,10E+04
3C_5.0EM_3CCR	$y=501.88*x^{-0.131}$	2,23E+05
1.5C_3.5EM_0CCR	$y=648.51*x^{-0.173}$	4,93E+04
1.5C_3.5EM_3CCR	$y=577.30*x^{-0.159}$	6,15E+04
1.5C_5.0EM_0CCR	$y=684.58*x^{-0.176}$	5,58E+04
1.5C_5.0EM_3CCR	$y=523.17*x^{-0.135}$	2,11E+05

Tabella 5. 15: Tabella riepilogativa delle leggi a fatica alla per le diverse miscele oggetto di studio

Nella Tabella 5. 15 per ogni miscela oltre ad essere riportata la legge di fatica, è stato calcolato il valore di cicli che porterebbero a rottura il campione sottoposto ad una deformazione iniziale ϵ_0 pari a $100 \mu\epsilon$.

I valori ottenuti confermano che l'aggiunta di Polverino di Gomma nelle miscele con Emulsione Bituminosa al 5%, incrementano notevolmente le durate a fatica del materiale mentre, non si misurano incrementi significativi nelle miscele con il 3.5% di Emulsione.

CONCLUSIONI

Il processo di riciclaggio a freddo con emulsione bituminosa o bitume schiumato e cemento sta guadagnando il riconoscimento e la popolarità in tutto il mondo come un mezzo economico di ripristino delle pavimentazioni stradali in difficoltà (Jenkins et al., 2009).

L'idea di introdurre della gomma nel riciclato a freddo si basa sulle esperienze positive del passato con conglomerato bituminoso a caldo (HMA). In particolare, a seguito del processo denominato “dry”, dove il granulato di gomma viene utilizzato come sostituto di una piccola porzione degli aggregati fini e introdotto direttamente nella camera di miscelazione come componente addizionale.

La ricerca si è focalizzata sullo studio degli effetti dell'aggiunta del CCR all'interno di miscele di riciclato a freddo, stabilizzate con diverse percentuali di emulsione bituminosa e cemento, valutandone le proprietà volumetriche e meccaniche.

La scelta di utilizzare una CCR con granulometria fine, totalmente passante al setaccio da 1 millimetro, è legata alla idea di migliorare l'elasticità della miscela senza influenzare lo scheletro portante costituito dal RAP.

Di seguito sono elencate le principali conclusioni tratte da questa indagine:

- l'aggiunta di Polverino, migliora l'auto compattazione e la lavorabilità delle miscele, condizionando però la variazione volumetrica durante e dopo la compattazione.

A parità di percentuale del CCR, maggiore era il contenuto di Emulsione, minore è stato l'aumento misurato in volume a seguito della maturazione;

- la resistenza a trazione si riduce in seguito all'aggiunta di Polverino, tale riduzione è più evidente nelle miscele con poca Emulsione.

La diminuzione di ITS potrebbe essere correlata alla interazione tra cemento ed emulsione bituminosa con il CCR. Infatti il legame delle particelle di gomma con il cemento è scarso (Ganjian et al., 2009) (Liang-Hsing Chou et al., 2010) rispetto a quello ottenibile con il bitume. Quando il comportamento meccanico è imputabile al cemento, l'aggiunta di CCR è fortemente penalizzante per la resistenza del materiale.

- l'aggiunta di CCR nelle miscele, riduce anche i valori ITSM mentre non condiziona la sensibilità termica del materiale. Più basso è il contenuto di bitume maggiore è risultata la riduzione se confrontato con le rispettive miscele senza Polverino;

- dall'analisi delle leggi di fatica, è evidente come l'introduzione di CCR nelle miscele, abbia benefici solamente per elevati tenori di Emulsione. Con Emulsione bituminosa al 3.5% infatti non si osservano incrementi di durata nella vita del materiale imputabili al Polverino.

L'utilizzo di Polverino di Gomma all'interno di miscele riciclate a fredde, può dunque aumentarne la durata nel tempo a discapito di una riduzione delle rigidità e dei valori di ITS. Come si vede da questa ricerca, inserire Polverino nelle miscele tradizionali, non è sufficiente a garantire un incremento della vita utile del materiale, ma questo può essere ricercato, progettando in modo accurato le miscele e valutando le interazioni tra le diverse componenti caso per caso.

I risultati descritti sono basati sullo studio di laboratorio riportato in questo documento. Qualsiasi altra indagine sul Polverino di Gomma utilizzato in sostituzione di aggregati fini in conglomerati bituminosi a freddo può portare a risultati differenti al variare delle caratteristiche dei materiali, delle proporzioni degli ingredienti della miscela, della procedura di polimerizzazione, e dell'uso di additivi.

A tal proposito, è in corso uno studio che mira a valutare l'effetto di una diversa tipologia di Polverino di Gomma, ottenuto per frantumazione a temperatura ambiente, mettendo in evidenza le principali differenze con il CCR ottenuto mediante macinazione criogenica.

BIBLIOGRAFIA

- Cristina Rapisarda Sassoon, “Per uno sviluppo durevole e sostenibile”, Network sviluppo sostenibile, 2005
- Donati, Antonini, “Il mattone ritrovato”, Bologna, 2004.
- Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997 n.22 (Decreto Ronchi), attuazione delle Direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi, 94/62/CEE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio.
- www.rete.toscana.it
- Nicosia, Lucchese, Rizzo, Ercoli, “Riciclo di rifiuti da demolizione: un contributo all’ecobilancio”, Palermo, 1998.
- Avagnano, “L’approvvigionamento di materiali inerti per opere civili: problemi e prospettive”, Cave e Cantieri, 1993.
- Iacuzzi R., “Gestione di rifiuti speciali, materiali recuperabili nella realizzazione di infrastrutture viarie”, AIAT.
- Foschi R., “Il presente e il futuro del riciclaggio in Italia”, Le Strade n°10, Ottobre, 1999.
- www.edilportale.com

- Accordo di programma per il recupero dei residui da costruzione e demolizione nella Provincia di Bologna approvata da Consiglio Provinciale con Delibera n.70 del 24/07/2001 e modificato con Delibera Consiliare n.90 del 23/07/2002.
- www.siteb.it
- Muncy S. G., “Cold in-place recycling practices in North America”, Eurasphalt & Eurobitume 1993, pp.885-889, Stoccolma, 16-18 Giugno 1993.
- Associazione mondiale della strada – AIPCR, comitato nazionale italiano, “Tecniche e aspetti normativi del riciclaggio nelle pavimentazioni stradali”, ANAS s.p.a., 25° Convegno Nazionale Stradale, Napoli, 4-7 Ottobre 2006.
- Decreto Legislativo 3 Aprile 2006 n.152, “Norme in materia ambientale”, supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale, 14/04/2006.
- Olmi, Tebaldi, “Studio sperimentale sul comportamento a fatica dei conglomerati bituminosi ottenuti con le tecniche del riciclaggio a freddo e a caldo”, 11° Convegno SIIV, Verona, 2001.
- Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade, “Tecniche di riciclaggio delle pavimentazioni stradali, manuale per l’uso corretto dei conglomerati bituminosi fresato”, Commissione riciclaggio SITEB, Roma,2002.
- Wirtgen Group, “Manuale riciclaggio a freddo”, Wirtgen, seconda edizione Novembre, 2004.
- Kearney, “Cold mix recycling: state of the practice, asphalt paving technology”, vol.66, UTHA, 1997.
- Egli Ag, “riciclaggio complesso a freddo di grande qualità”, sito internet www.coldrecycling.com.

- Foschi, “Manutenzione delle pavimentazioni bituminose”, rivista Le Strade n.3, Marzo 1998.
- Iter Chimica s.p.a., “Rigenerazione a freddo dei conglomerati bituminosi”, rivista Le Strade e Autostrade n.3, Maggio-Giugno 1997.
- Diomedes M., “Definizione della percentuale di materiale di recupero e di agente rigenerante nel riciclaggio a caldo”, Atti del Convegno SIIV , Milano, 19-20 Ottobre 1998, pp.417-427.
- Ravagnoli S., “Emulsioni bituminose, applicazioni, suggerimenti e note tecniche”, Prima edizione, SITEB, 2004.
- Tesoriere, “Strade, ferrovie, aeroporti – Volume secondo”, Utet, pp. 71-76, 168-188.
- AIPCR, “Modified binders, binders with additives and special bituminous”, rivista Routes-Roads n.303, Marzo 1999.
- Autostrade s.p.a., “Manutenzione pavimentazioni, norme tecniche d’appalto”, 1998.
- Santagata, Chiappinelli, “L’influenza del tipo di emulsione sulle caratteristiche volumetriche e meccaniche di conglomerati bituminosi riciclati a freddo”, 11° Convegno SIIV, Verona, 2001.
- Convezione di ricerca tra l’Università di Parma- DICAtEA e la Società VALLI ZABBAN s.p.a. di Sesto Fiorentino (FI), “Valutazione del ruolo del legante sulla resistenza a fatica di conglomerati bituminosi riciclati a freddo con emulsione bituminosa e cemento”.
- Collepari M., “Scienza e tecnologia del calcestruzzo”, Hoepli, Milano, Dicembre 1991. pp.7-85.

- Brown S., Needham D., “Study of cement modified bitumen emulsion mixture”, AAPT, Volume n.69, Reno, U.S.A, 2000.
- Ferrari, Giannini, Ingegneria stradale, corpo stradale e pavimentazioni”, UTET, Torino, 1996. pp.73-203.
- www.tfhr.gov, Turner Fairbank Highway Research Center, “Reclaimed Asphalt Pavement, material description”.
- Bocchi L., De Ferraris L., Festa B., Peroni G., Tecniche di riciclaggio, manutenzione e rafforzamento delle pavimentazioni: innovazioni, sperimentazioni e tendenze”, AIPCR, 23° Convegno Nazionale Stradale, Verona, 18-21 Maggio 1998.
- Visconti M., Randaccio L., “I prodotti per riciclare a freddo”, rivista Le Strade n.10, Ottobre 1999.
- Jacobson T., Hornwall F., Cold recycling of asphalt pavement-mix in plant”, Eurasphalt & Eurobitume 2000, Barcellona, vol.2, 20-22 Settembre 2000, pp.260-267.
- Hanzik Š., Hanzic V., “A contribution to applications of used asphalt mixtures by cold techniques”, Eurasphalt & Eurobitume 2000, Barcellona, vol.2, 20-22 Settembre 2000. pp.218-221.
- Normativa UNI EN 12697-10, “Bituminous Mixture – Test method for hot mix asphalt – Part 10: Compactability”.
- Normativa UNI EN 12697-31, “Bituminous Mixture – Test method for hot mix asphalt – Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor”.
- Normativa UNI EN 12697-26, “Bituminous Mixture – Test method for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness”.

- Normativa UNI EN 12697-24, “Bituminous Mixture – Test method for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue.
- Simone, Bonini, Sangiorgi, “The influence of Portland cement on cold-mix asphalt recycling”, Salamanca (Spain), 2001.
- Oulahana, Zizi, Benhassaine, “BitumenEmulsion-cement: Hydraulic reactivity and breaking of the emulsion”, Eurasphalt & Eurobitume Congress,1996.
- Montepara, Giuliani, “A study on design and performance of recycled pavements cold-stabilised with cement and bituminous emulsion”.
- Santagata, Chiappinelli, “Valutazione comparativa di emulsioni bituminose modificate per il riciclaggio a freddo dei conglomerati bituminosi”.
- Pereira, Picado-Santos, “Technical-economical evaluation of pavement recycling alternatives”, Third gulf Conference of Roads, 2006.
- Olmi E., Tebaldi G., “Studio sperimentale sul comportamento a fatica dei conglomerati bituminosi ottenuti con le tecniche di riciclaggio a freddo e a caldo”, 11° Convegno SIIV, Verona, 2001 dal sito internet www.siiv.it.
- AEMA (asphalt emulsion manufacturers association) & Asphalt Institute, “A basic asphalt emulsion manual”, manuale n.19, terza edizione.
- users.unimi.it/rspoli/petapp/cementi.ppt, Principali componenti del cemento Portland.
- Rode F., Weinert F., “Cold placing in asphalt road construction”, Eurasphalt & Eurobitume 1993, Stoccolma, 1993, pp.298-301.
- De Palma C., Santagata E., Bassani M., “Indagine sperimentale sull’impiego della pressa a taglio giratoria”, atti del convegno SIIV, Pisa, 1997.

- Di Benedetto H., Francken L., De La Roche C., “Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM interlaboratory tests” in Mechanical Tests for Bituminous, RILEM, 1997.
- Collop A., Read J. M., “Practical fatigue characterization of bituminous paving mixtures”, Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists n. 66, USA, 1997.
- Mazza, G.D.; I rifiuti da cantiere edilizio: possibilità di riciclaggio; in RS-Rifiuti Solidi, anno VII- numero 6, nov-dic 1993, citato in Rigamonti, Ennio; Dati quantitativi e qualitativi sulla produzione di rifiuti da C&D; in: La gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione; Istituto per l’Ambiente, Milano, 1995 (Rapporto 95/02).
- Jacobsen, G.B.; Quantitativi, composizione e riciclaggio degli scarti di costruzione e demolizione in Europa; in: RS-Rifiuti Solidi, anno 6, n.2 , marzo 1992.
- Nicosia, Lucchese, Rizzo, Ercoli, “Riciclo di rifiuti da demolizione: un contributo all’ecobilancio”, Palermo, 1998.
- Iacuzzi R., “Gestione di rifiuti speciali, materiali recuperabili nella realizzazione di infrastrutture viarie”, AIAT.
- European Commission, Directorate-General Environment, DG ENV.E.3, Management of Construction and Demolition Waste, Working Document N°1, 4 April 2000, pp. 1-26.
- Jenkins K.J. van de Ven M.F.C., Molenaar A.A.A. and de Groot J.L.A, 2002. Performance Prediction of Cold Foamed Bitumen Mixes. Ninth International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen, Denmark. pp16.

- Hurley G.C. and Prowell B.D., 2006. Evaluation of Evotherm for use in Warm Mix Asphalt. Report NCAT 06-02. National Centre for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, USA.
- Collings D.C., 2001. Experiences Gained from Ten Years of Pavement Rehabilitation by In Situ Recycling with Cement and Combinations of Cement/Bituminous Stabilising Agents. 1st International Symposium on Subgrade Stabilisation and In Situ Pavement Recycling using Cement, Salamanca, Spain.
- Jenkins K.J., 1994. Analysis of the performance of a pavement layer which has been treated by single pass in situ stabilisation. MSc (Eng) Thesis, University of Natal, South Africa.
- Asphalt in Figures 2010, European Asphalt Pavement Association, EAPA.