

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA

DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA GEOMATICA E DEI TRASPORTI

Ciclo XXIV

Settore Concorsuale di Afferenza 08/A3

Settore Scientifico Disciplinare ICAR-04

CARATTERIZZAZIONE AVANZATA IN LABORATORIO DI
MATERIE PRIME SECONDARIE RIGENERATE O STABILIZZATE CON
EMULSIONE DI BITUME E LEGANTI CEMENTIZI

Presentata da:

Dott. Ing. PIERPAOLO VIOLA

Coordinatore Dottorato:

Chiar.mo Prof. Ing. GABRIELE BITELLI

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing. GIULIO DONDI

Esame finale anno 2013

PAROLE CHIAVE

RICICLAGGIO A FREDDO

STABILIZZAZIONE CON EMULSIONE BITUMINOSA E CEMENTO

CONGLOMERATO BITUMINOSO DI RECUPERO

POLVERINO DI GOMMA

COLD RECYCLING

BITUMINOUS EMULSION AND CEMENT TREATED MATERIALS

RECLAIMED ASPHALT

CRUMB RUBBER

ADVANCED LABORATORY CHARACTERIZATION OF SECONDARY RAW MATERIALS RECLAIMED OR STABILIZED WITH BITUMEN EMULSION AND CEMENT BINDERS

ABSTRACT

Waste materials reclamation is a subject of great interest in road construction as well as in all other areas of civil engineering. Research and experts attention is focused on the improvement of recycling techniques that can reduce the environmental impact without compromising the final mechanical performances. These investigations try to match the needs of waste disposal with those of infrastructural industry, linked to obtaining building materials technically appropriate and cost effective.

Currently there are several types of products already reclaimed and reused in the pavements construction and there are also those newly introduced that are still involved in the testing phase. In particular, in addition to materials resulting from the pavement recycling operations, those derived from the operation of transport activities are to be considered. They include hundreds of thousands of tons of rubber tires that every year reach the end of their life.

The goal of this experimental analysis is to provide references and information on the cold recycling technique with bituminous emulsion and cement, studying the possible application of this method in combination with the crumb rubber obtained from end of life tires. The research is characterized by a dual purpose: first is to further promote the technique of cold recycling which is being imposed for its numerous economic and environmental advantages, especially related to the operating temperature; the second is to experiment the use of the crumb rubber, in the two forms obtained from traditional and cryogenic mechanical shredding, added to mixtures entirely consisting of reclaimed asphalt from milling of existing pavements and stabilized with different percentages of bituminous emulsion and cement binder.

SOMMARIO

INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1: IL PROBLEMA DEI RIFIUTI.....	5
1.1 SVILUPPO SOSTENIBILE	5
1.1.1 <i>Concetto di sostenibilità</i>	5
1.1.2 <i>Politiche pubbliche per la sostenibilità</i>	10
1.1.3 <i>Sostenibilità in campo stradale</i>	12
1.2 RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE (C&D)	18
1.2.1 <i>Produzione e composizione</i>	19
1.2.2 <i>Recupero</i>	26
1.3 FRESATO (RA).....	33
1.3.1 <i>Proprietà</i>	36
1.3.2 <i>Produzione e gestione</i>	38
1.4 PNEUMATICI FUORI USO (PFU).....	41
1.4.1 <i>Caratteristiche e composizione degli pneumatici</i>	42
1.4.2 <i>Recupero e gestione degli PFU</i>	46
1.5 QUADRO NORMATIVO	52
1.5.1 <i>Leggi comunitarie e nazionali</i>	53
1.5.2 <i>Incentivi al recupero</i>	80

CAPITOLO 2: RICICLAGGIO A FREDDO.....	89
2.1 RICICLAGGIO DELLE PAVIMENTAZIONI.....	89
2.1.1 <i>Metodi di riciclaggio</i>	91
2.1.2 <i>Scelta della soluzione d'intervento</i>	96
2.2 TECNICHE DI RICICLAGGIO A FREDDO.....	98
2.2.1 <i>Materiali stabilizzati a bitume</i>	98
2.2.2 <i>Stabilizzazione con emulsione bituminosa</i>	104
2.2.3 <i>Stabilizzazione con bitume schiumato</i>	108
2.2.4 <i>Componente fluida nei BSM</i>	112
2.3 RICICLAGGIO A FREDDO IN SITO.....	114
2.3.1 <i>Vantaggi e svantaggi</i>	117
2.3.2 <i>Fasi di lavorazione</i>	121
2.3.3 <i>Treni di riciclaggio</i>	126
CAPITOLO 3: STABILIZZAZIONE CON EMULSIONE E CEMENTO.....	137
3.1 EMULSIONE BITUMINOSA.....	138
3.1.1 <i>Componenti</i>	139
3.1.2 <i>Tipi di emulsione</i>	147
3.1.3 <i>Produzione, stoccaggio e trasporto</i>	152
3.1.4 <i>Proprietà e ruolo dell'emulsione</i>	156
3.2 CEMENTO.....	159
3.2.1 <i>Produzione</i>	161
3.2.2 <i>Idratazione, presa e indurimento</i>	163
3.2.3 <i>Proprietà e ruolo del cemento</i>	172
3.3 AGGREGATI E FILLER.....	173
3.3.1 <i>Caratteristiche</i>	175
3.3.2 <i>Filler</i>	184
3.3.3 <i>Ruolo della granulometria</i>	186
3.4 ACQUA.....	190

3.4.1	<i>Ruolo dell'acqua</i>	191
3.5	ADDITIVI.....	192
CAPITOLO 4: PROGRAMMA SPERIMENTALE E MATERIALI		195
4.1	PROGETTO DI RICERCA	195
4.1.1	<i>Polverino di gomma</i>	196
4.1.2	<i>Obiettivo della sperimentazione</i>	204
4.1.3	<i>Articolazione generale</i>	205
4.2	PROGETTO DELLA MISCELA.....	208
4.2.1	<i>Miscela</i>	208
4.2.2	<i>Materiali</i>	210
CAPITOLO 5: ANALISI DI PREQUALIFICA		223
5.1	CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI.....	223
5.1.1	<i>Miscelazione</i>	223
5.1.2	<i>Compattazione</i>	229
5.1.3	<i>Maturazione</i>	236
5.2	ANALISI DELLE PROPRIETÀ VOLUMETRICHE.....	237
5.2.1	<i>Curve di addensamento</i>	237
5.2.2	<i>Variazione delle caratteristiche post compattazione</i>	249
5.2.3	<i>Analisi al microscopio elettronico</i>	256
5.3	PROVA DI RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA ITS	262
5.3.1	<i>Procedura e attrezzatura di prova</i>	262
5.3.2	<i>Tensioni massime e spostamenti a rottura</i>	267
5.3.3	<i>Confronto dei polverini tradizionale e criogenico</i>	274
CAPITOLO 6: CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DINAMICA		281
6.1	CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI.....	281
6.1.1	<i>Miscelazione, compattazione e maturazione</i>	281
6.1.2	<i>Taglio</i>	282

6.2	PROVA DI MODULO RIGIDEZZA ITSM.....	284
6.2.1	<i>Definizione e teoria.....</i>	284
6.2.2	<i>Procedura e attrezzatura di prova.....</i>	293
6.2.3	<i>Moduli ITSM e sensibilità termica dei materiali.....</i>	300
6.2.4	<i>Moduli ITSM e maturazione dei provini</i>	307
6.3	PROVA DI FATICA ITFT.....	313
6.3.1	<i>La fatica: definizione e teoria.....</i>	313
6.3.2	<i>Procedura e attrezzatura di prova.....</i>	323
6.3.3	<i>Curve di fatica</i>	327
	CONCLUSIONI.....	339
	BIBLIOGRAFIA.....	345

INTRODUZIONE

Il recupero dei materiali di scarto è un aspetto di grande attualità in campo stradale, così come negli altri ambiti dell'ingegneria civile. L'attenzione della ricerca e degli esperti del settore è rivolta all'affinamento di tecniche di riciclaggio che riducano l'impatto ambientale senza compromettere le prestazioni meccaniche finali. Tali indagini cercano di far corrispondere le necessità di smaltimento dei rifiuti con quelle dell'industria infrastrutturale, legate al reperimento di materiali da costruzione tecnicamente idonei ed economicamente vantaggiosi.

Attualmente sono già diversi i tipi di prodotti rigenerati e riutilizzati nella realizzazione delle pavimentazioni stradali e numerosi sono anche quelli di nuova introduzione in fase di sperimentazione. In particolare, accanto ai materiali derivanti dalle operazioni di recupero della rete viaria, è opportuno considerare anche quelli provenienti dall'esercizio delle attività di trasporto, il quale comporta ogni anno il raggiungimento della fine della vita utile per centinaia di migliaia di tonnellate di pneumatici di gomma.

L'obiettivo della presente analisi sperimentale è quello di fornire indicazioni e informazioni in merito alla tecnica di riciclaggio a freddo con emulsione bituminosa e

cemento, valutando la possibilità di applicazione di tale metodologia in combinazione con il polverino di gomma, ottenuto dal recupero degli pneumatici fuori uso (PFU). La ricerca si distingue per una duplice valenza: la prima è quella di promuovere ulteriormente la tecnica di riciclaggio a freddo, che si sta imponendo per i suoi numerosi vantaggi economici ed ambientali, legati soprattutto alla temperatura d'esercizio; la seconda è quella di sperimentare l'utilizzo del polverino di gomma, nelle due forme di granulazione tradizionale e criogenica, additivato a miscele costituite interamente da materiale proveniente da scarifica di pavimentazioni esistenti e stabilizzate con diverse percentuali di emulsione di bitume e di legante cementizio. La sperimentazione si articola in più fasi successive: una è quella di analisi preliminare e progettazione della composizione delle diverse miscele da realizzare; l'altra è quella di confezionamento e maturazione dei provini e analisi delle proprietà di addensabilità e lavorabilità; la fase finale consiste in una caratterizzazione meccanica, durante la quale i campioni vengono sottoposti a diversi test di tipo tradizionale e prestazionale.

L'esposizione degli argomenti trattati è organizzata e suddivisa in sei parti.

Il primo capitolo introduce il concetto di sviluppo sostenibile e riporta i principali materiali di scarto utilizzati in campo stradale, con particolare riferimento ai rifiuti da costruzione e demolizione (C&D), al conglomerato bituminoso di recupero o fresato (RA) e agli pneumatici fuori uso (PFU). Nella parte conclusiva viene sintetizzato il quadro normativo con i maggiori riferimenti legislativi concernenti le attività coinvolte nel processo di recupero e riciclaggio a livello comunitario, nazionale e locale.

Il secondo capitolo descrive le principali tecniche di riciclaggio utilizzate nel

campo delle pavimentazioni stradali, in impianto e in sito, a caldo e a freddo. In particolare il capitolo si concentra su quest'ultimo tipo, ossia sui metodi che consentono il riutilizzo del conglomerato bituminoso di recupero a temperatura ambiente.

Il terzo capitolo approfondisce la miscela confezionata a freddo mediante stabilizzazione con emulsione di bitume e cemento, entrando nel merito delle sue proprietà principali, dei singoli componenti e dei loro ruoli. Tale tipologia di miscela, applicata in combinazione con il polverino di gomma, è alla base della caratterizzazione di laboratorio.

Il quarto capitolo introduce la fase sperimentale: in esso sono riportati gli obiettivi, il programma e la sua organizzazione. In particolare vengono descritte le caratteristiche di tutti i materiali utilizzati nel confezionamento ed il progetto delle miscele, dove è stabilita la composizione di ciascuna miscela, con i dosaggi e le sue proprietà.

Il capitolo quinto illustra la fase di analisi di prequalifica e riporta i risultati sperimentali e le considerazioni relative al confezionamento e maturazione dei campioni, alle proprietà volumetriche e alle variazioni post-compattazione, nonché alla caratterizzazione meccanica tradizionale. L'analisi di prequalifica consente l'individuazione delle variabili in gioco e una prima selezione delle miscele più idonee.

Il sesto capitolo si concentra sulla caratterizzazione meccanica dinamica, descrive le prove prestazionali per la determinazione del modulo di rigidità e della resistenza a fatica eseguite sui provini selezionati nell'analisi di prequalifica e riporta i risultati e le analisi comparative, in funzione dei diversi dosaggi e della tipologia di

polverino di gomma utilizzato.

Alcune considerazioni conclusive completano l'esposizione.

CAPITOLO 1:

IL PROBLEMA DEI RIFIUTI

1.1 SVILUPPO SOSTENIBILE

1.1.1 CONCETTO DI SOSTENIBILITÀ

Il mondo moderno è governato da ritmi sempre più frenetici in ogni ambito della vita sociale. L'evoluzione della società, in un contesto di globalizzazione estremamente elevato che ha portato e continua a portare ad un progressivo livellamento delle differenze culturali, necessita quotidianamente di servizi e risorse per le singole persone. Ciò significa che i bisogni principali di ogni individuo, non coincidenti necessariamente con quelli primari, vengono spesso ad essere molto simili, fino ad identificarsi nel caso di persone che agiscano all'interno di nuclei territoriali e comunitari complessivamente analoghi.

Individui affini in società sempre più conformi e interconnesse presenteranno necessità e bisogni sempre più simili, cui sarà possibile fare fronte tramite un sistema di servizi e utenze che, proprio a causa della globalizzazione, offrirà soluzioni

anch'esse analoghe. Questo aspetto risulta particolarmente evidente nei Paesi emergenti, dove si sta verificando una rapida ascesa sociale che punta a raggiungere gli standard di vita dei Paesi sviluppati.

Il risvolto negativo di tale sviluppo è che la crescita accelerata 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 *sostenibilità* e, soprattutto, di *sviluppo sostenibile*.

La sostenibilità è essenzialmente la capacità di durare e resistere nel tempo. La parola deriva dal latino *sustinēre* (da *sus*, su e *tenēre*, tenere) e diverse sono le definizioni presenti nel dizionario: dare supporto, prolungare e supportare/sostenere. Oggi il termine è molto inflazionato ed è applicato genericamente ad ogni aspetto della vita, sebbene sia sempre più spesso impiegato nel contesto della sostenibilità umana sulla Terra.

Nel suo rapporto del 1987 la Commissione Mondiale per l'Ambiente e lo Sviluppo (*Brundtland-Commission of the United Nations*) ha definito il concetto di sviluppo sostenibile nella maniera seguente: "*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 e lo Sviluppo (*Earth Summit*) nel 1992. Da allora, governi e organizzazioni a livello nazionale, regionale e locale hanno tenuto in considerazione il concetto di sostenibilità nelle loro politiche e programmi e hanno

fatto progressi per implementare il concetto nella loro pratica.

Negli ultimi anni è stato sottolineato come sia necessario bilanciare accuratamente le richieste economiche, sociali e ambientali, affinché uno sviluppo sostenibile possa realizzarsi. Nella Figura 1.1 è rappresentato graficamente l'equilibrio tra questi fattori, che sono definiti come i "tre pilastri della sostenibilità".

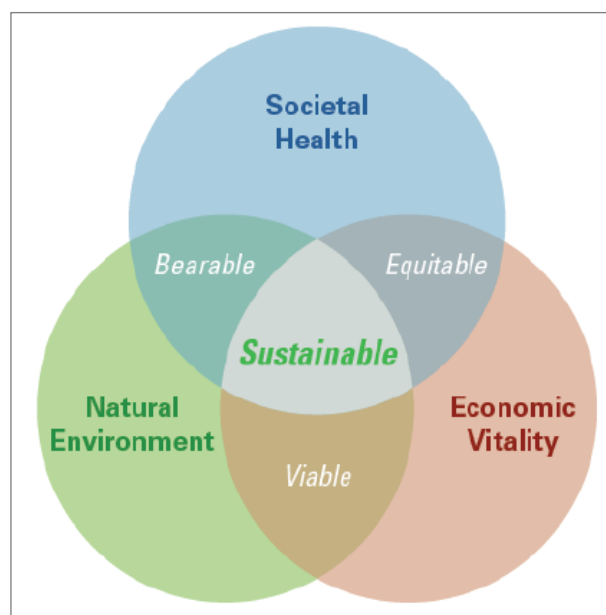


Figura 1.1: I tre pilastri della sostenibilità.

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 si fa riferimento in primo luogo a un processo di produzione di valore, ma è la sostenibilità a 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 sancisca un dominio distruttivo dell'uomo sulla natura, ma che ne consenta lo sviluppo. Ciò si può realizzare 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 tali risorse 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:

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

Sostenibilità è quindi un concetto sistemico, che si relaziona alla coesistenza dei

fattori economici, sociali e ambientali della società umana. Essa è concepita 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 soddisfare i propri bisogni ed esprimere il loro più grande potenziale nel presente. Nel contempo occorre sempre tenere presenti la biodiversità e gli ecosistemi naturali pianificando e agendo al fine di mantenerli 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 affinché essa si possa realizzare, 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 sostenibilità¹;
2. rilevanza per la realtà in esame²;
3. misurabilità e convenienza³;

¹ Devono permettere il monitoraggio del processo di sviluppo sostenibile, anche a lungo termine rispetto agli obiettivi considerati; in altre parole, devono dimostrare se gli obiettivi sono o non sono stati raggiunti, a fronte di valori di riferimento o di target numerici.

² Devono essere rilevanti per il contesto 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 aggiornati.

4. comprensibilità⁴;
5. sensibilità⁵;
6. coerenza⁶;
7. capacità di sintesi⁷;
8. affidabilità⁸;
9. disaggregabilità⁹;

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

1.1.2 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.

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 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.

- 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 debbano essere considerate in modo trasversale rispetto alle politiche sociali ed economiche, puntando quindi ad integrare la dimensione ambientale, quella economica e quella sociale. Accanto agli impegni a livello nazionale, viene data grande importanza al ruolo degli enti locali la cui partecipazione e cooperazione è un fattore determinante nel perseguimento degli obiettivi.

Gli elementi fondamentali del processo di Agenda 21 locale sono: la descrizione del Quadro Diagnostico¹⁰, il Forum¹¹ ed il Piano di Azione Ambientale¹².

In Italia le Agende 21 locali rappresentano ormai un'esperienza molto diffusa; queste dovrebbero essere supportate da un nuovo orientamento che, passando attraverso l'integrazione delle politiche degli enti di governo locale, arrivi alla realizzazione degli 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

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 Enti 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.

contabilità ambientale, il cui obiettivo è quello di 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 di quest'ultimo.

1.1.3 SOSTENIBILITÀ IN CAMPO STRADALE

Le esigenze e i vincoli di sviluppo nel campo delle costruzioni stradali, così come in tutti gli altri campi dell'ingegneria civile, non differiscono da quelli degli altri settori della vita sociale; la considerazione della sostenibilità e di pratiche sostenibili assume un ruolo centrale e focalizza quindi l'attenzione su una molteplicità di aspetti: il design strutturale, i materiali impiegati nell'infrastruttura, il processo costruttivo stesso e tutto ciò che è sotto il diretto controllo dell'ingegnere stradale.

Temi come il riciclaggio, uso di scarti/sottoprodotti industriali, conservazione delle risorse, inquinamento da CO₂ ed anche energia associata tendono ad acquisire un notevole interesse in tale contesto. Nasce così la necessità di caratterizzare e quantificare in termini di sostenibilità ogni aspetto dell'infrastruttura stradale, dalla sua concezione e progettazione alla costruzione, dall'esercizio in opera e manutenzione fino al termine della vita utile. Il miglior modo di determinare la sostenibilità di una scelta infrastrutturale sarebbe quello di impiegare una metodologia che misuri e quantifichi i fattori economici, ambientali e sociali

influenzati dalla pavimentazione durante tutto il suo ciclo vitale. La Figura 1.2 seguente riassume il concetto di sostenibilità applicato al campo stradale.

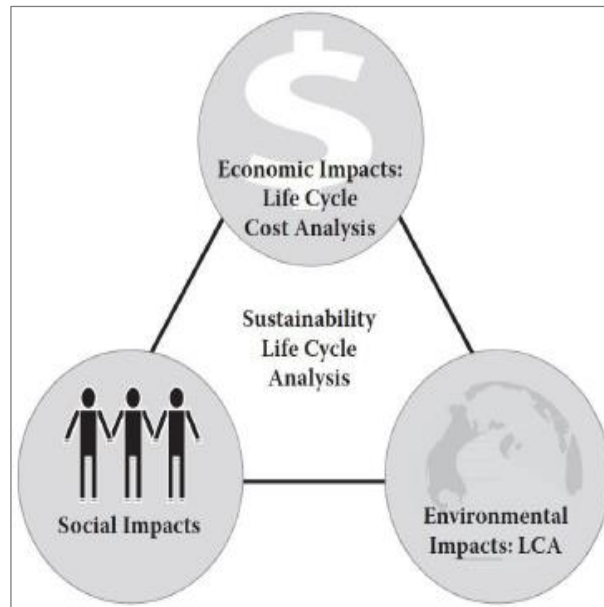


Figura 1.2: La sostenibilità in campo stradale.

Tale metodologia potrebbe essere utilizzata in diversi modi:

- analisi della pratica corrente e valutazione dei miglioramenti quando vengono introdotti;
- comparazione di diversi sistemi e soluzioni su base di giudizio oggettivo;
- valutazione dei benefici relativi riguardo ad approcci alternativi in termini di design, selezione dei materiali, ecc.

Al momento una metodologia completa di valutazione non è ancora pronta per essere implementata; sebbene i fattori economici siano stati identificati e possano essere misurati, un insieme di fattori ambientali e sociali appropriati non è ancora stato identificato, o generalmente accettato dall'industria ed i corrispondenti strumenti di misura non sono disponibili.

1.1.3.1 Fattori economici

In ogni progetto o per ogni sistema la buona pratica ingegneristica si prefigge il bilanciamento tra il bisogno di minimizzare i costi economici con la necessità di massimizzare l'efficienza, la qualità e la longevità. Tale equilibrio non può concentrarsi esclusivamente sulla riduzione dei costi iniziali di realizzazione, poiché ciò limiterebbe notevolmente l'operato dell'ingegnere e precluderebbe l'opportunità di prendere le giuste decisioni per la sostenibilità a lungo termine dell'infrastruttura.

L'approccio più adeguato per una corretta valutazione economica dovrebbe analizzare i costi dell'intero ciclo vitale di un sistema, adottando una procedura d'analisi del tipo: *Life Cycle Cost Analysis (LCCA)*. Un tale metodo è basato su criteri economici che considerano il valore temporale del denaro, i costi iniziali, quelli futuri previsti e il valore ultimo alla fine del periodo di servizio.

Nella pratica, però, la maggior parte degli approcci *LCCA* utilizzati dalle società appaltatrici include solamente i costi sostenuti dalle stesse, quali quelli riguardanti la costruzione iniziale, la preservazione, la riabilitazione ed il valore residuo. È possibile e forse consigliabile includere nell'analisi i costi dell'utilizzatore; essi comprendono, per esempio, i costi finanziari di chi transita derivanti dalla preservazione della strada e dalle attività di manutenzione. Altri costi economici che possono essere considerati includono quelli finanziari per la tutela dell'ambiente, qualora si preveda un rilevante impatto sul contesto ambientale.

1.1.3.2 Fattori ambientali

Al centro di un'analisi dell'opera durante tutto il suo ciclo di vita, o con un approccio di tipo "inizio-fine" (*end-to-end*), vi è l'idea di: *Life Cycle Assessment (LCA)*.

La *Life Cycle Assessment* è una metodologia che valuta l'insieme di interazioni che il prodotto o il servizio ha con l'ambiente, considerando il suo intero periodo di esercizio. La *LCA* considera gli impatti ambientali del caso esaminato nei confronti della salute umana, della qualità dell'ecosistema e dell'impoverimento delle risorse, considerando inoltre gli impatti di carattere economico e sociale.

L'obiettivo di questo approccio è quello di assicurare che tutti gli effetti e i fattori 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 del termine 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.

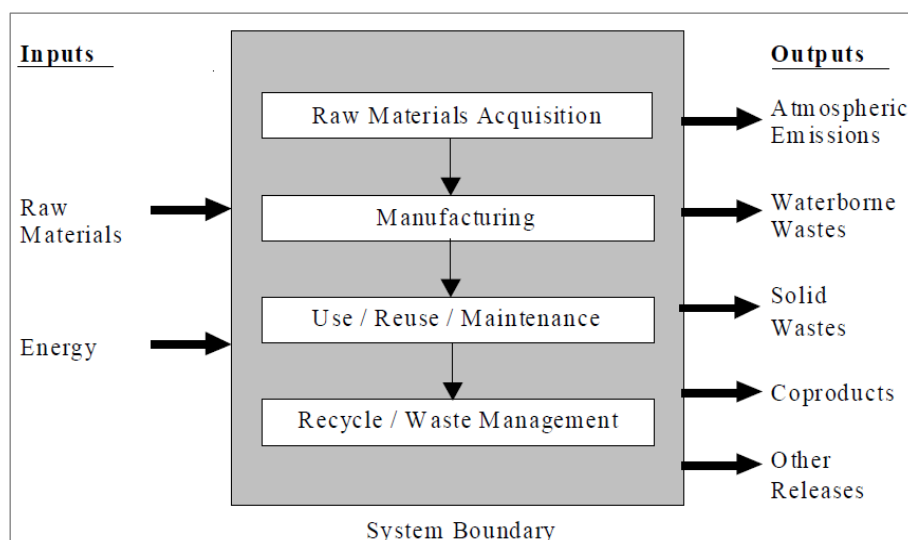


Figura 1.3: Concetto di *Life Cycle Assessment* [2].

L'uso del termine *life cycle* si riferisce quindi a tutte le maggiori attività

necessarie nel periodo di vita del prodotto: pre-produzione (inclusa l'acquisizione delle materie prime necessarie), produzione, uso (incluso riuso e manutenzione), riciclaggio e dismissione finale [2]. La Figura 1.3 illustra schematicamente il concetto di *LCA*, includendo i fattori d'ingresso, d'uscita e le fasi del sistema.

Nella Figura 1.4 sono richiamate le principali attività caratteristiche di una pavimentazione stradale.

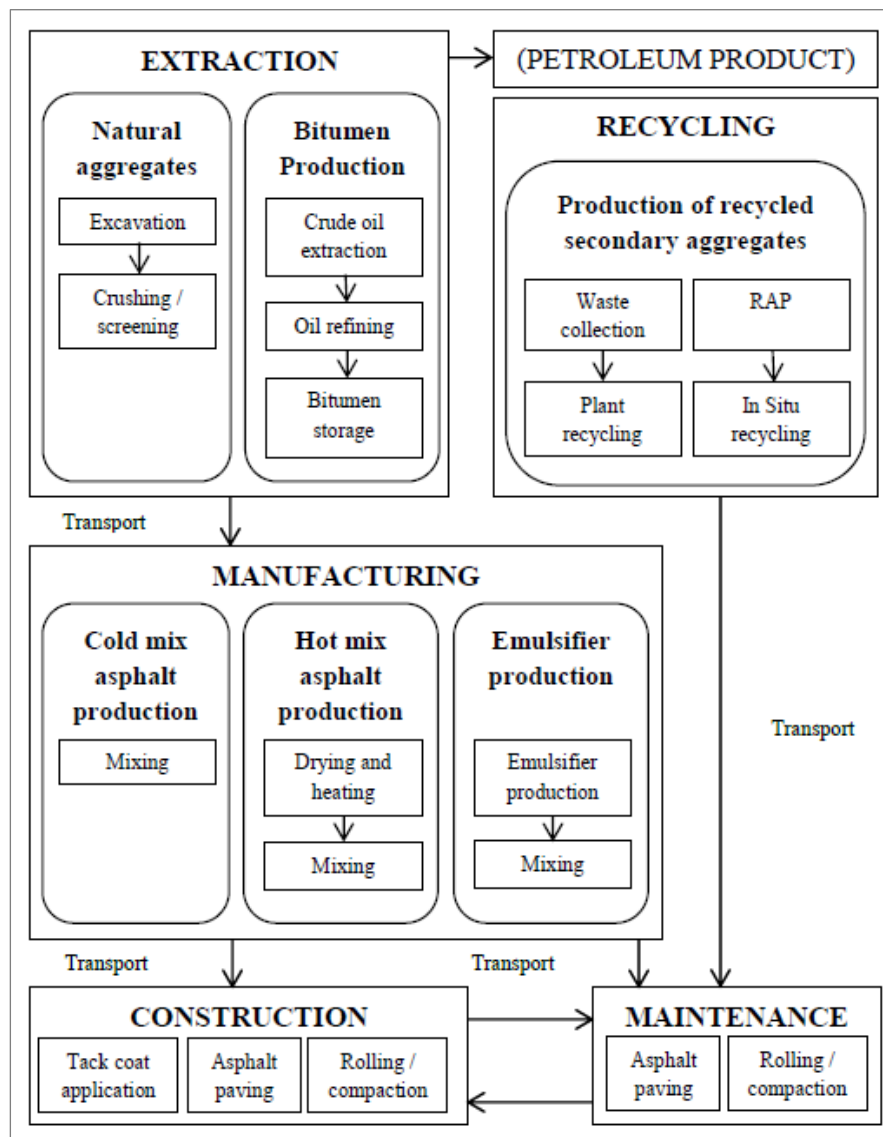


Figura 1.4: Principali processi di una pavimentazione stradale [3].

Nonostante la maggior parte degli approcci odierni non consideri nella valutazione della sostenibilità dell'infrastruttura stradale l'impatto del traffico durante la fase di esercizio (dato che il movimento del veicolo non è considerato come parte della strada), tale analisi consente di focalizzare l'attenzione sui diversi aspetti d'interazione tra la pavimentazione e l'ambiente: energia, emissioni, materie prime, riscaldamento globale potenziale, acqua sfruttata, materiali pericolosi, ecc. In conclusione, i parametri raccomandati per la valutazione dell'impatto ambientale di una generica pavimentazione stradale possono essere riassunti nel modo seguente:

- energia richiesta;
- emissioni / riscaldamento globale potenziale;
- tossicità potenziale;
- consumo di materie prime;
- rifiuti generati.

1.1.3.3 Fattori sociali

La società è profondamente dipendente dall'abilità delle persone e dei beni di spostarsi rapidamente ed efficientemente da un luogo all'altro. Il livello di mobilità consentito dalla rete stradale rappresenta quindi uno dei fattori sociali critici per la sostenibilità della rete stessa. L'altro fattore sociale impattante è l'effetto che l'infrastruttura ha sulla qualità della vita delle comunità circostanti (logistica, posizionamento, livello estetico, contributo al rumore, impatti sulla sanità, ecc.).

Nonostante l'industria della pavimentazione stradale abbia fatto grandi progressi nello sviluppo di strumenti per l'analisi dei fattori di sostenibilità descritti in precedenza (*LCCA* per l'analisi degli aspetti economici e *LCA* per quelli ambientali)

nessun sistema oggettivo è ancora disponibile per valutare i fattori sociali. Alcuni dei potenziali parametri che dovrebbero essere tenuti in considerazione nella valutazione sono:

- sicurezza;
- ritardi dell'utente;
- inquinamento acustico;
- energia associata.

1.2 RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE (C&D)

A fianco del problema relativo ai rifiuti solidi, negli ultimi vent'anni ha acquisito maggiore importanza quello riguardante lo smaltimento di rifiuti quali terre e rocce di scavo, materiale derivante dalla costruzione e demolizione di edifici e sovrastrutture stradali.



Figura 1.5: Rifiuti da costruzione e demolizione.

Tutti questi prodotti di scarto sono raggruppabili nella categoria dei rifiuti da Costruzione e Demolizione C&D e possono essere distinti secondo il settore di provenienza in:

- rifiuti da costruzione di edifici e infrastrutture civili;
- rifiuti da demolizione totale o parziale di edifici e infrastrutture civili;
- rifiuti da costruzioni e manutenzione di strade;
- terreno e rocce provenienti da movimenti terra, opere civili e di scavo.

I suddetti rifiuti sono prevalentemente costituiti da materiali inerti classificabili come rifiuti speciali non pericolosi (CER e D.L. 22/97) e, previo idoneo trattamento, possono essere recuperati e riutilizzati nella costruzione di nuove strade, di ferrovie o nei calcestruzzi. Da un punto di vista ambientale, infatti, lo smaltimento degli scarti da C&D rappresenta una determinante negativa in termini di: occupazione di suolo, possibile inquinamento, spreco di energia e di materia “incorporata” nei rifiuti, ecc. Il loro reimpiego quali materiali da costruzione può quindi generare un impatto positivo sull’ambiente, a cui si aggiunge la limitazione del prelievo di inerti naturali vergini, con un bilancio complessivo favorevole in termini di recupero e riciclaggio.

1.2.1 PRODUZIONE E COMPOSIZIONE

I rifiuti da C&D costituiscono una quota percentuale rilevante della produzione totale di rifiuti in tutti i Paesi Europei; dalle diverse fonti e dalle più recenti stime disponibili emerge che i primi menzionati rappresentano circa il 31-33% in peso di tutti i rifiuti prodotti in Europa, attestandosi ad una produzione annua pari a circa 870 milioni di tonnellate [2].

In Italia il settore del riciclaggio dei rifiuti inerti è stato avviato negli anni '80 e, sebbene si sia sviluppato fino ad oggi andando a costituire un vero e proprio comparto industriale, la sua crescita è avvenuta senza un adeguato controllo da parte delle istituzioni. Basti pensare che fino ad oggi non esiste un censimento ufficiale degli impianti di trattamento, non esistono dati certi e affidabili né sulla produzione di rifiuti da C&D né sulla loro gestione e non esistono norme aggiornate e strumenti tecnici relativi all'utilizzo degli aggregati riciclati.

La crescente attenzione della Comunità Europea verso questo settore ha tuttavia stimolato nel tempo anche in Italia un interessamento da parte della pubblica amministrazione. Una condizione indispensabile per intraprendere un'adeguata politica di gestione dei rifiuti provenienti dal settore delle costruzioni e demolizioni è la conoscenza dei quantitativi in gioco, sia di produzione sia di recupero.

In ambito nazionale l'organismo ufficiale che annualmente elabora e dichiara i dati relativi ai rifiuti è l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). In questa trattazione verranno pertanto riportati e analizzati i dati contenuti nel più recente "Rapporto Rifiuti Speciali" di ISPRA [4]. Tali dati sono stati desunti dalle dichiarazioni presentate nell'anno 2010 e si riferiscono pertanto all'anno 2009. La produzione dei rifiuti speciali è stata quantificata da ISPRA sulla base delle informazioni contenute nelle banche dati MUD (Modulo Unico di Dichiarazione ambientale che tutti i soggetti i quali 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). Tali banche dati, in attesa che venga reso operativo il nuovo sistema di tracciabilità dei rifiuti (SISTRI), rappresentano fino ad oggi la fonte principale di informazione.

Il D.Lgs. 152/06 prevede tuttavia diverse esenzioni dall'obbligo di dichiarazione e pertanto la banca dati MUD non può essere considerata ugualmente esaustiva per tutti i settori. Per quanto concerne il settore delle costruzioni e demolizioni va rilevato, infatti, che il D.Lgs. 152/06 ha introdotto l'esenzione dall'obbligo di dichiarazione per tutti i produttori di rifiuti speciali non pericolosi. Ciò ha portato a una marcata diminuzione della produzione dichiarata di rifiuti speciali non pericolosi, con conseguente sottovalutazione della produzione reale degli stessi e presumibilmente ad un aumento in percentuale dei casi di evasione dalla normativa dei rifiuti.

Con il Correttivo al Codice dell'Ambiente (D.Lgs. 4/2008) è stato ripristinato, in parte, l'obbligo di dichiarazione annuale al Catasto, ma rimangono ancora escluse le aziende produttrici di rifiuti speciali non pericolosi con numero di addetti inferiore a 10 che, nell'ambito dell'impreditoria edile, rappresentano la maggioranza delle imprese sul mercato.

Al fine di sopperire, in parte, alla carenza di informazioni derivante dalle esenzioni previste dalla norma, l'ISPRA ha proceduto a integrare i dati MUD mediante l'utilizzo di specifiche metodologie di stima. In particolare, il dato di produzione dei rifiuti non pericolosi per il settore delle costruzioni e demolizioni è stato desunto dai dati dichiarativi MUD inerenti alle operazioni di gestione.

Considerato quanto premesso, 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, del 7.3% circa. La produzione dei rifiuti speciali non pericolosi risulta pari a circa 52.6 milioni di tonnellate (Tabella 1.1 e Figura 1.6).

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 1.1: Produzione nazionale rifiuti speciali [4].

All'elenco precedente vanno aggiunte circa 8.7 milioni di tonnellate relative alle stime integrative effettuate riguardo al settore manifatturiero e a 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.

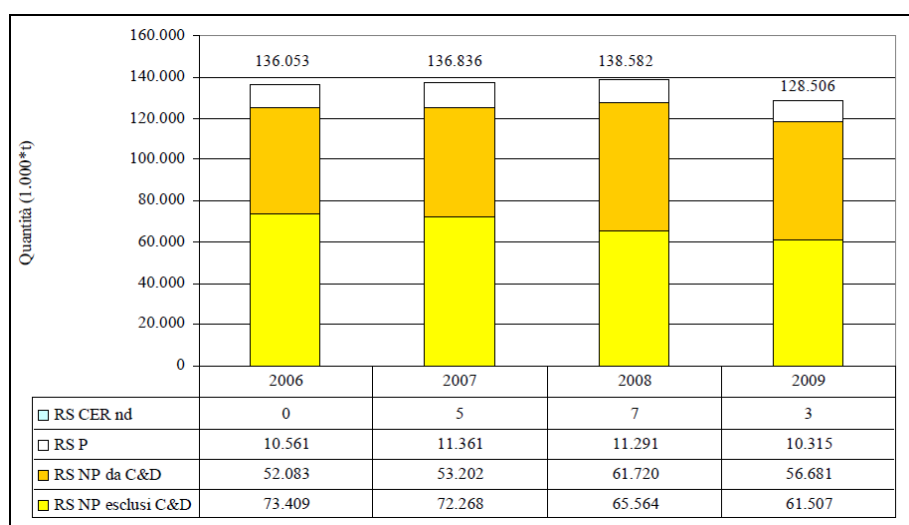


Figura 1.6: Produzione nazionale rifiuti speciali [4].

L'analisi dei dati per attività economica (secondo la classificazione Ateco 2002) conferma che il maggior contributo alla produzione complessiva dei rifiuti speciali è dato dal settore delle costruzioni e demolizioni (Codice Ateco 45) con una percentuale, nell'anno 2009, pari al 46.1% del totale prodotto.

Relativamente ai soli rifiuti speciali non pericolosi la ripartizione percentuale tra le diverse attività riflette 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 rifiuti speciali non pericolosi (Figura 1.7).

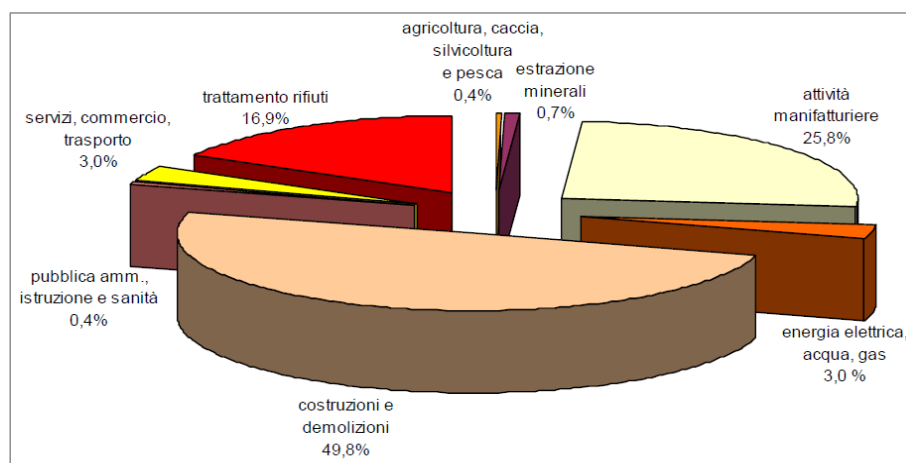


Figura 1.7: Ripartizione produzione totale RS non pericolosi per attività economica [4].

Dai dati sulla produzione di rifiuti risultanti dall'elenco europeo suddiviso in capitoli si rileva che il 99% dei rifiuti afferenti al capitolo 17, ossia provenienti dalle operazioni di costruzione e demolizione, sia rappresentato da quelli non pericolosi (Figura 1.8).

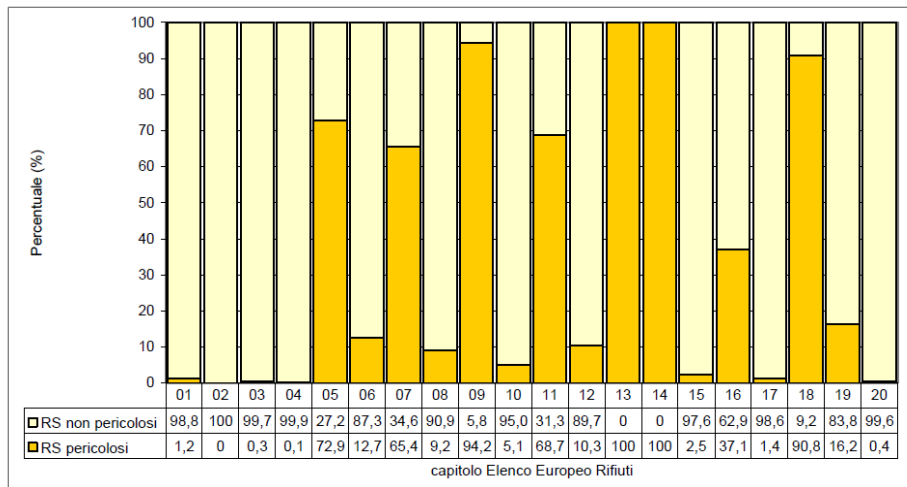


Figura 1.8: Ripartizione RS pericolosi e non pericolosi per Capitolo Elenco Europeo [4].

Per quanto riguarda invece l’attendibilità dei dati sulla produzione dei rifiuti speciali non pericolosi nell’ambito della costruzione e della demolizione, sebbene stimati, ISPRA ha verificato una soddisfacente correlazione tra gli stessi e l’andamento interno lordo del settore. Una buona correlazione è anche stata osservata tra il dato di produzione dei rifiuti e quello afferente alle unità di lavoro del settore, espresse come valori medi annui in migliaia.

Per quanto concerne la composizione dei rifiuti da costruzione e demolizione a livello europeo, essa risulta molto variabile e fortemente dipendente dalla diversa origine e da numerosi fattori: tipologie e tecniche costruttive locali, clima, attività economica e sviluppo tecnologico del territorio, disponibilità locale di materie prime e materiali da costruzione. Le componenti che risultano comuni nei rifiuti da C&D sono: terreno e 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, ecc. La Figura 1.9 riporta la composizione percentuale relativa dei vari costituenti dei rifiuti da C&D per alcuni Paesi Europei.

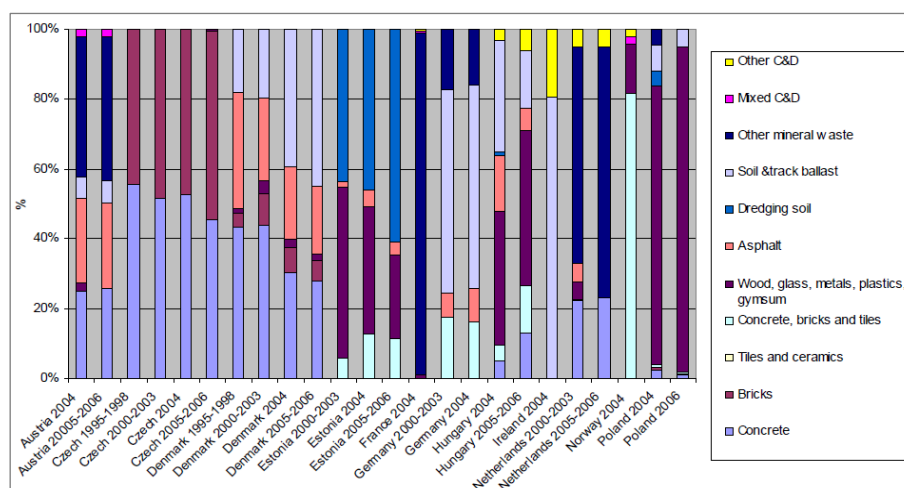


Figura 1.9: Composizione % dei rifiuti C&D in Europa [6].

In ambito nazionale, per quanto riguarda la natura e le caratteristiche dei rifiuti da 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 quelli italiani a causa di differenze spesso rilevanti nei materiali e nelle tecnologie di costruzione e dunque nei rifiuti prodotti. Diverse fonti ritengono realistica una ripartizione che attribuisce rispettivamente alle attività di demolizione il 90% circa del quantitativo (in massa) di rifiuti C&D prodotti, il 5÷7% alle attività di manutenzione e il 2÷3% alle attività di costruzione.

La Tabella 1.2 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. Di minore entità, ma non di minore importanza, sono i conglomerati bituminosi derivanti da scarificazione stradale; tali

rifiuti saranno approfonditi successivamente e sono oggetto d'interesse della presente sperimentazione.

CATEGORIA DI RIFIUTO	% PESO SU TOTALE
Calcestruzzo	30.0
Laterizio (tegole, mattoni, forati)	50.0
Conglomerati bituminosi	5.0
Scavi	6.0 – 10.0
Carta e cartone	0.6 – 4.0
Metallo	3.0
Varie	1.0 – 1.4

Tabella 1.2: Composizione percentuale rifiuti C&D in Italia [7].

1.2.2 RECUPERO

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

- *frazione riutilizzabile*, costituita da quegli elementi che possono essere riportati alla loro forma precedente e riconvertiti direttamente alla loro funzione originaria: finestre, inferriate di balconi, travi, ecc;
- *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, quest'ultima non ha conservato né la forma né la funzione originarie;

- *frazione inutilizzabile*, costituita dai componenti indesiderati presenti nel materiale da riciclare o dalle frazioni che contengono inquinanti, da conferire in discarica o trattare separatamente.

In Europa, 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 e il riciclaggio di questa tipologia di rifiuti non pericolosi con obiettivi di recupero pari almeno al 70% in termini di massa.

I dati disponibili sul riciclo dei rifiuti da C&D per alcuni dei Paesi europei sono riportati di seguito. La Figura 1.10 mostra che la maggior parte degli Stati membri ha una percentuale di riciclo al di sopra del 60%: Danimarca, Germania, Irlanda Olanda e Estonia riciclano persino oltre l'80% dei rifiuti da C&D. Durante gli ultimi anni sembra che i tassi di riciclo siano ulteriormente cresciuti e l'incremento delle quantità riciclate indica che le politiche nazionali ed europee volte a dirottare i rifiuti avviati alle discariche verso attività di recupero del materiale stanno producendo buoni risultati.

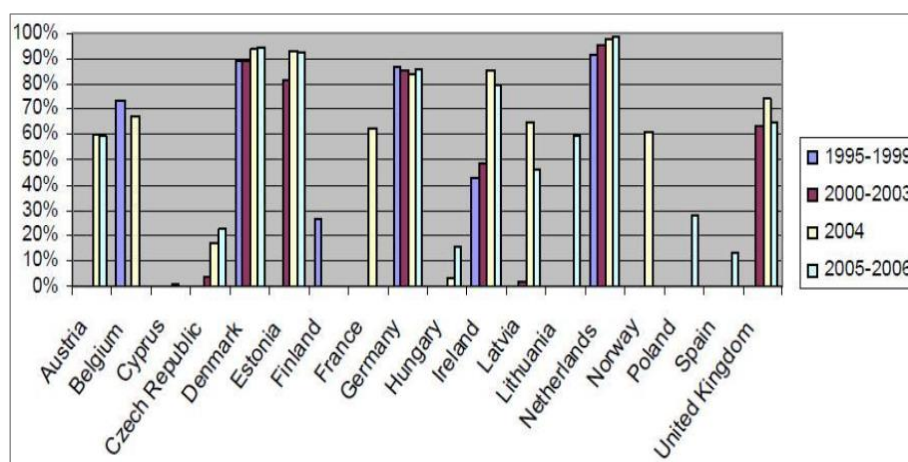


Figura 1.10: Riciclo rifiuti C&D per abitante, percentuale su totale prodotto [6].

Per quanto riguarda la composizione percentuale della frazione riciclata dei rifiuti da C&D, con un occhio di riguardo per i conglomerati bituminosi, la Figura 1.11 è indicativa della situazione di alcuni paesi europei.

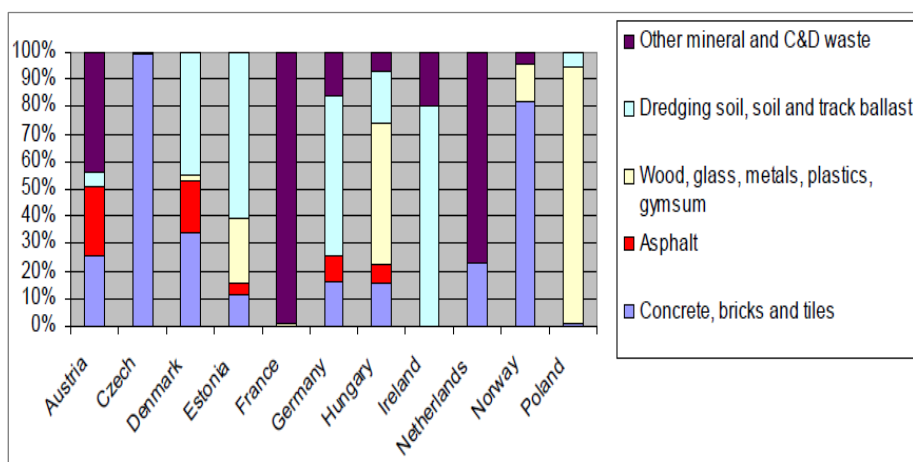


Figura 1.11: Composizione frazione riciclata rifiuti C&D per alcuni Paesi Europei [6].

In Italia, premettendo la lacunosità e la carenza di informazioni relative anche al riciclo e recupero dei rifiuti da C&D, viene riscontrato un certo ritardo rispetto agli altri paesi europei: infatti già nel 1990, secondo le stime della *European Demolition Association* (EDA), 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 1.3 [10]. 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.

Stato	Produzione C&D (migliaia di ton)	% 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 1.3: Statistiche produzione rifiuti C&D [8].

Per quanto riguarda le statistiche nazionali si dispone dei dati del “Rapporto Rifiuti speciali 2012” dell’ISPRA [4] che nel 2009 stima una produzione degli stessi pari a ben 56.7 milioni di tonnellate, con una stima di riciclo pari a 37.1 milioni di tonnellate e un tasso di recupero che sarebbe del 65%. Sembrerebbe un dato molto positivo e prossimo alla soglia di recupero prevista dalla Direttiva 2008/98/CE, se non fosse la stessa ISPRA ad avvisare che una parte importante di questi rifiuti sono utilizzati “in rimodellamenti morfologici o copertura periodica o finale delle discariche”. Una parte di tale quantitativo, infatti, è impropriamente considerata

come recupero (categoria R5), mentre dovrebbe essere conteggiata come smaltimento. Un'altra parte viene effettivamente impiegata in forme di recupero, ma certamente non possiede le caratteristiche per essere un vero e proprio prodotto da costruzione (rispondente cioè a precise specifiche tecniche e regolarmente marcato CE).

Tale andamento segnala un potenziale problema che ostacola il decollo di un vero sistema di riciclo, in grado di fornire prodotti con caratteristiche qualitative idonee per realizzare veri e propri prodotti da costruzione. La gestione sostenibile dei residui prodotti dalle attività C&D trova quindi parecchi ostacoli, sia di natura 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, riuso e 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. Lo smaltimento in discarica, che in molti casi rappresenta ancora la via cui sono indirizzati i rifiuti inerti, non è solo un costo ambientale diretto (quello della discarica stessa), 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 ed incoraggiando buone pratiche, buone tecnologie e gestioni più efficienti, diventa possibile non solo recuperare una quota maggiore dei rifiuti prodotti che sfuggono ai controlli, ma migliorare anche l'efficacia e la redditività economica delle attività di recupero.

La conseguenza naturale è l'ottenimento di maggiori prodotti riutilizzabili e prodotti di migliore qualità che consentono dei vantaggi: sostituire effettivamente materie prime vergini, con risparmio di cave e territorio, spuntare prezzi migliori e una significativa capacità di affermarsi sul mercato. 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, 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 1.12).

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.

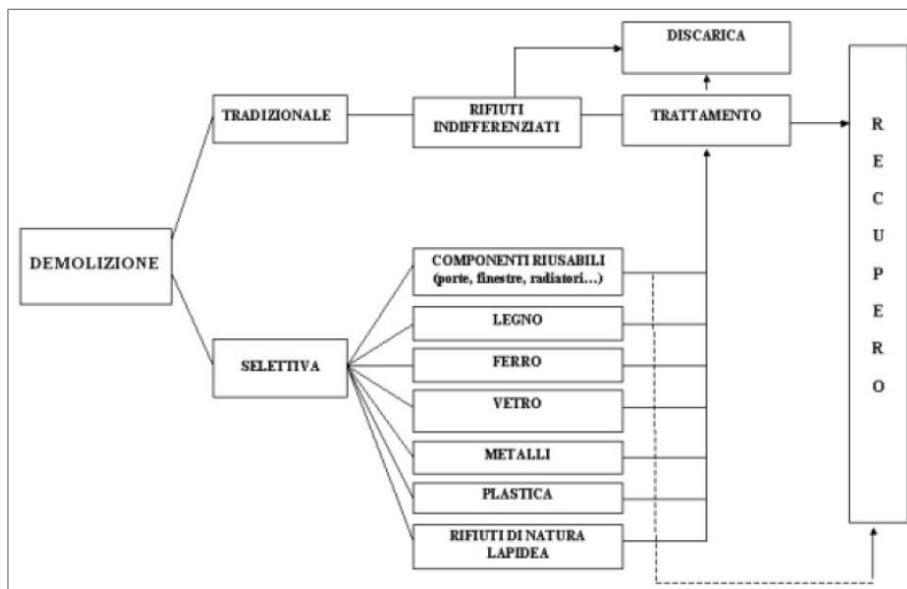


Figura 1.12: Flusso dei rifiuti da C&D. Demolizione tradizionale e selettiva.

Il processo di produzione dell'aggregato riciclato, a partire dai rifiuti 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, bensì un risparmio energetico (Tabella 1.4).

ATTIVITÀ	ENERGIA (kW/h)	
	Cava pietra naturale	Impianto riciclo rifiuti C&D
Frantumazione*	2.5	2.0
Estrazione**	4.0	---
Movimentazione**	3.0	0.2
Vagliatura*	Inclusa nella frantumazione	0.2
Depolverizzazione	---	0.7
* Energia in kW/h, riferita ad 1 t di inerte.		
** Energia in kW/h, riferita ad 1 m ³ di inerte.		

Tabella 1.4: Consumi energetici stimati per fasi di lavorazione [9].

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 e la riduzione delle pezzature. 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 verrebbe 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.

1.3 FRESATO (RA)

Il fresato o conglomerato bituminoso di recupero, così come è definito dalla norma *EN 13108 (Miscela bituminose - Specifiche del materiale. Parte 8: conglomerato bituminoso di recupero)* è un prodotto di elevate caratteristiche tecniche, totalmente riutilizzabile nell'ambito delle stesse costruzioni stradali da cui proviene. Con tale termine, o più in generale *Reclaimed Asphalt (RA)*, si indica il materiale di rifiuto ottenuto dalla rimozione di conglomerati bituminosi in opera, quindi un vero e proprio rifiuto da costruzione e demolizione.

Nella pratica il fresato bituminoso è una miscela di aggregati con una curva granulometrica propria caratterizzata da un'elevata percentuale di fini e contenente bitume invecchiato. Esso si ottiene dalla frantumazione a blocchi o dalla fresatura della pavimentazione stradale, per cui può essere correttamente definito alla stregua

di un materiale inerte bitumato e non consolidato.



Figura 1.13: Conglomerato bituminoso di recupero.

La rimozione può avvenire per fresatura (da cui appunto il termine fresato) del conglomerato bituminoso tramite fresa autocarrata o per demolizione (scarifica) degli strati bituminosi per mezzo di opportuni macchinari (escavatore, ripper, scraper, ecc.) che producono blocchi a lastre irregolari di conglomerato bituminoso demolito da frantumarsi, se necessario, in seguito. Entrando nel merito delle demolizioni, nel caso in cui fosse richiesta una lieve scarifica della pavimentazione, essa si attua con una fresatrice che arriva a rimuovere conglomerato fino ad una profondità di 50 millimetri per singola passata. Volendo invece rimuovere completamente la sovrastruttura si ricorre a bulldozer o a sistemi pneumatici. A demolizione avvenuta, per il fresato ottenuto esistono 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.

Il fresato è definito quindi 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 con una sua curva granulometrica, generalmente caratterizzata da percentuali superiori di materiali fini e che contiene bitume invecchiato. In alcuni casi il vecchio legante può essere catrame che, provenendo dal carbone, contiene un'alta percentuale di elementi cancerogeni che ne impediscono il suo reimpiego nella realizzazione di nuove strade attraverso la tecnica del riciclaggio.

Nella tecnica stradale il riciclaggio è definito come il recupero ed il riutilizzo delle materie prodotte dalla dismissione degli strati di conglomerato bituminoso ammalorati per il rifacimento dei diversi strati, superficiali e portanti, costituenti le pavimentazioni stradali. Preliminarmente è necessario il riconoscimento dei requisiti qualitativi del RA, da valutare all'interno dell'attività di laboratorio e sotto i seguenti aspetti:

- percentuale di legante;
- vetustà del legante;
- tipo e qualità dell'aggregato utilizzato;
- curva granulometrica.

La conoscenza delle caratteristiche del legante originario è importante sia per assicurarsi che questo sia in grado di recuperare, mediante la rigenerazione, tutte le caratteristiche perse per invecchiamento ed ossidazione, sia per valutare che esso non sia eccessivamente "duro" o rigido. Per quanto riguarda gli aggregati, che costituiscono l'elemento principale del fresato, questi possono essere calcarei o

silicei; è importante stabilire la loro natura per selezionare il legante o l'agente stabilizzante più idoneo. A tal proposito è buona regola predisporre opportune prove di laboratorio, al fine di verificare la compatibilità tra gli elementi, l'opportuna lavorabilità dell'impasto, l'idonea presa finale e le caratteristiche prestazionali in esercizio.

1.3.1 PROPRIETÀ

Le caratteristiche prestazionali e quindi anche meccaniche del fresato sono fortemente influenzate dai materiali che lo compongono e dalla funzione che eseguirà il conglomerato d'origine (strato di base, usura, binder, ecc.). Come noto, infatti, il differente compito di ciascun singolo strato in conglomerato bituminoso costituente la pavimentazione induce sostanziali differenze nella natura, qualità e pezzatura degli aggregati. Il conglomerato bituminoso proveniente dalle vecchie pavimentazioni esauste viene trattato con la frantumazione o la fresatura; la prima tecnica comporta una minore percentuale di materiale fino nella miscela di risulta rispetto alla seconda. La macinatura e la frantumazione del RA 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 RA 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 RA prodotto può essere frantumato o macinato in particelle di dimensioni inferiori a 38 mm, sempre che la massima dimensione degli aggregati non sia

superiore a 63 mm.

L'intervallo tipico di distribuzione delle particelle che risultano normalmente dai processi di frantumazione o macinatura del RA viene riportato in Tabella 1.5.

DIMENSIONE SETACCI	% 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 1.5: Composizione granulare del RA.

Nonostante la carenza di dati a disposizione riguardanti il RA in letteratura, si può affermare con una buon'approssimazione che la densità di volume del RA frantumato, alla fine di tutti i trattamenti, è lievemente inferiore a quella 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 %.

Il conglomerato bituminoso proveniente dalla demolizione di pavimentazioni

esistenti presenta normalmente un contenuto di legante tra il 45% ed il 6%, ed è piuttosto rigido a causa dell'ossidazione subita durante la stesa e in fase d'esercizio. Estrae ed analizzandolo il bitume contenuto nel conglomerato fresato, esso esibisce in genere 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 10 dmm e 80 dmm mentre la viscosità, a 60°C, ha valori che oscillano da un minimo di 4000 Poises ad un massimo di 25000 Poises e, quanto più è esteso il periodo di servizio, tanto più la viscosità è elevata. La Tabella 1.6 presenta in modo sommario i valori tipici delle proprietà fisiche e meccaniche del RA.

TIPOLOGIA	PROPRIETÀ	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 bitume	10-80 a 25°C
	Viscosità assoluta	4000-25000 poise a 60°C
Proprietà meccaniche	Peso specifico compattato (asciutto)	1600-2000 kg/m ³
	California Bearing Ratio (CBR) (dopo una settimana)	100% RA: 20-25% 40% RA-60% vergine: ≥150%

Tabella 1.6: Proprietà fisiche e meccaniche del RA.

1.3.2 PRODUZIONE E GESTIONE

Secondo la *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 “tiepide” (*hot e warm mix asphalt*). Negli ultimi anni si è verificata una tendenza involutiva, certamente influenzata dalla crisi economica mondiale oltre che dall’implicito effetto di saturazione della stessa rete stradale.

Il nostro Paese si colloca attualmente al quinto posto, a quota 29 Mt, nella classifica europea di tale produzione relativa all’anno 2010 che vede in testa la Germania (45 Mt), seguita da Francia (38.8 Mt), Turchia (35.3 Mt) e Spagna (34.4 Mt). Nello stesso anno si sono generati 11 milioni di tonnellate di fresato, subito dietro la Germania, capoclassifica con 14 Mt, con un suo reimpiego in applicazioni di riciclaggio a caldo e tiepido pari al 20%. Tale dato è nettamente inferiore a quello riportato per altri paesi europei che in certi casi riutilizzano l’80-100% del materiale prodotto.

A tali dati deve affiancarsi quello dell’analisi delle modalità 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 è interessata, oramai da anni, da una carenza di manutenzione strutturale rafforzativa, necessaria per far fronte ai crescenti livelli di traffico 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.

Nel contempo 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 a tecniche di riciclaggio, quale strumento manutentorio di valorizzazione del patrimonio stradale, trova quindi più che ampia giustificazione, nella migliore tutela 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.

Purtroppo le attività di riciclaggio dei conglomerato bituminoso 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 conglomerato bituminoso fresato come materia prima seconda.

L'analisi critica di tale fenomeno, condotta recentemente dall'Associazione Mondiale della Strada AIPCR (*Association Internationale Permanente des Congres de la Route*) 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, che rappresenta un deterrente ai fini della ricerca e dell'innovazione;
- sbilanciamento tra domanda ed offerta;

- comune convincimento che i materiali e le tecniche di riciclo siano più costosi di quelli tradizionali.

In conclusione, il fresato per le sue proprietà meccaniche e fisiche può essere considerato un vero e proprio inerte e come tale dovrebbe essere valorizzato per limitare lo sfruttamento delle risorse naturali, con benefici economici, ambientali e sociali.

1.4 PNEUMATICI FUORI USO (PFU)

Oggigiorno gli pneumatici equipaggiano la maggior parte dei mezzi di trasporto destinati ad un utilizzo stradale e costituiscono un problema significativo nel momento in cui raggiungono il termine della loro vita utile, dato il peso relativo che il trasporto su strada ricopre nel sistema globale dei trasporti.



Figura 1.14: Pneumatici fuori uso.

Lo pneumatico fuori uso è un rifiuto speciale non pericoloso, identificato nell'elenco europeo dei rifiuti con il codice CER 16 01 03, ovvero appartenente alla categoria di "rifiuti prodotti dallo smantellamento di veicoli fuori uso e dalla manutenzione di veicoli".

È necessaria una distinzione precisa tra pneumatico fuori uso e pneumatico usato, in quanto il primo (PFU) è lo pneumatico non più utilizzabile che non può essere sottoposto a ricostruzione; viceversa il secondo (PU) ha una struttura integra che ne consente il reimpiego tal quale o previa ricostruzione. La distinzione tra PFU e PU è netta e anche sottolineata dal DM del 09/01/2003 che ha espunto gli pneumatici ricostruibili dalla definizione del CER 16 01 03, attribuendo lo status di non-rifiuto allo pneumatico usato.

1.4.1 CARATTERISTICHE E COMPOSIZIONE DEGLI PNEUMATICI

Gli pneumatici sono costituiti da una struttura toroidale elastica di gomma naturale o sintetica e possono essere di due tipi:

- *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;
- *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 in Figura 1.15, è costituita dal battistrada e dalla carcassa.



Figura 1.15: Struttura dello pneumatico.

- *battistrada (1)*: è la parte dello 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. Di fondamentale importanza è la miscela, la quale deve garantire un giusto compromesso tra la resistenza all'usura e una buona aderenza in tutte le condizioni d'esercizio. Le miscele tradizionali sono costituite da composti elastomeri (gomma naturale, gomma stirene-butadiene SBR, 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;
- *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 rende la loro struttura unitaria. La carcassa di uno pneumatico da autovettura include la componente tessile, non presente invece negli pneumatici per autocarri che inglobano una percentuale maggiore di acciaio. La parte laterale della carcassa viene chiamata *spalla* (3) e assolve due compiti: 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.

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. Nella Figura 1.16 e nella Figura 1.17 sono riassunte le composizioni medie degli pneumatici di autoveicoli ed autocarri.

Ciascun ingrediente della mescola contribuisce a dare allo pneumatico delle specifiche caratteristiche, con lo scopo di incrementarne la vita utile. Per attribuire alla gomma cruda delle caratteristiche di robustezza ed elasticità occorre sottoporla a processi di vulcanizzazione, che diano origine a legami tra le molecole che la compongono. Tale processo ha l'ulteriore conseguenza di rendere la miscela

estremamente resistente all'azione di microrganismi, che impiegano più di cento anni prima di riuscire a distruggere i suddetti legami, rendendo impossibile lo smaltimento degli pneumatici nelle discariche.

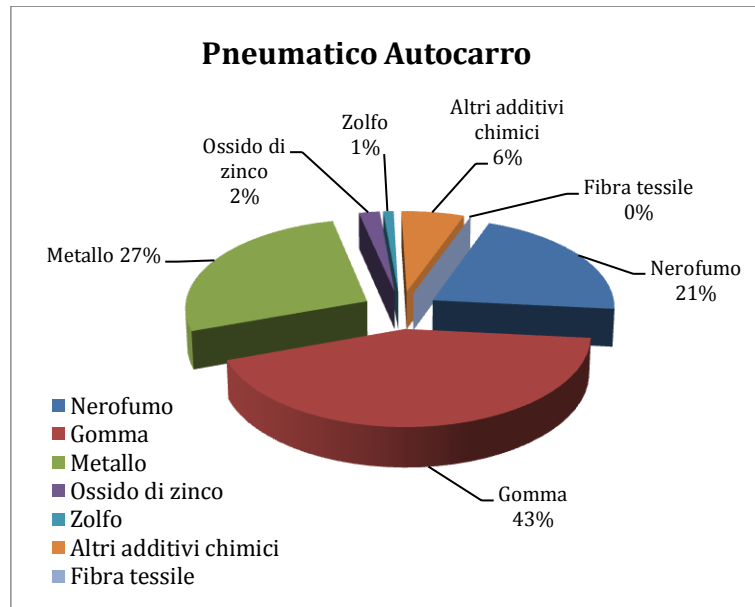


Figura 1.16: Composizione tipica degli pneumatici degli autocarri.

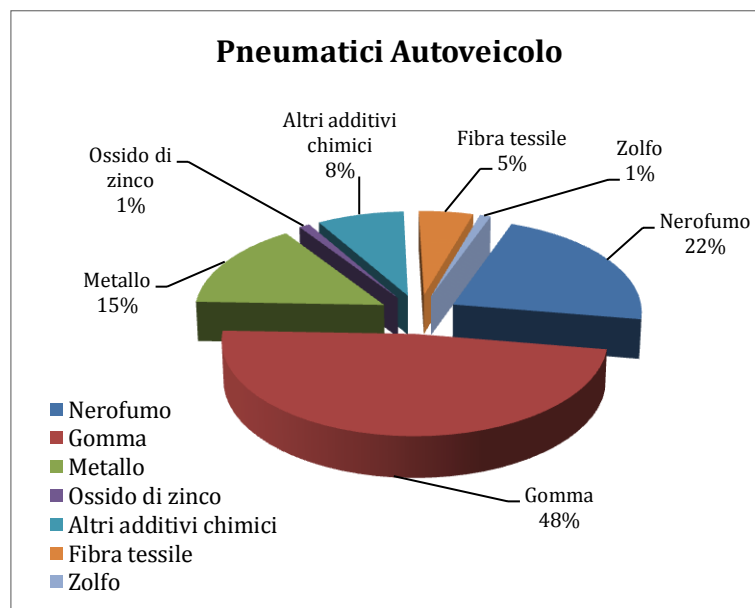


Figura 1.17: Composizione tipica degli pneumatici degli autoveicoli.

1.4.2 RECUPERO E GESTIONE DEGLI PFU

Lo pneumatico usato, una volta staccato dal veicolo, non è automaticamente identificato come rifiuto. Le strade che può figurativamente ancora percorrere sono molteplici e dipendono da numerosi fattori, quali:

- il livello di usura;
- la predisposizione alla ricostruzione;
- la domanda di mercato;
- la volontà del detentore.

La combinazione di questi fattori può infatti decidere la sorte dello pneumatico, che può quindi essere riutilizzato, ricostruito o frantumato e valorizzato in varie forme di recupero e riciclo.

Esiste una corrispondenza quasi speculare nella lista di priorità individuate dalla Direttiva rifiuti 2008/98/CE, che è stata recentemente recepita a livello nazionale dal DM 205/2010 e che propone la ben nota gerarchia dei rifiuti:

- *prevenzione*: riutilizzo degli pneumatici usati, in applicazioni meno performanti o con ricostruzione di quelli non divenuti rifiuto;
- *preparazione per il riutilizzo*: ricostruzione degli pneumatici usati divenuti rifiuto;
- *riciclaggio*: recupero di materia dagli PFU, ad esempio produzione di granuli e polverini di gomma;
- *recupero di altro tipo*: recupero di energia dagli PFU, ad esempio incenerimento in cementifici;
- *smaltimento*: smaltimento in discarica degli PFU di largo diametro (>1.4 m).

Il livello più alto nella gerarchia dei rifiuti è certamente rappresentato dalla prevenzione, la quale si deve prefiggere di evitare la creazione di un rifiuto laddove possibile. Gli pneumatici che possiedono ancora una profondità del battistrada superiore al limite legale e non sono danneggiati nella struttura possono essere usati senza alcun trattamento preliminare al fine di rimandare di fatto la produzione di un rifiuto.

Il processo di ricostruzione degli pneumatici usati permette di utilizzare le carcasse strutturalmente ancora integre per produrre pneumatici, impiegando solo il 30% circa di nuovi polimeri e risparmiando circa il 70% dell'energia di processo. La ricostruzione avviene attraverso numerose fasi di lavorazione che comprendono la rasatura del battistrada e la sua sostituzione con uno nuovo.

Quando invece gli pneumatici sono troppo usurati per essere riutilizzati per il loro scopo originario, sono considerati fuori uso ed entrano in un sistema di gestione basato sul riciclo. In tal caso attraverso il recupero di materiale si ottengono altri prodotti altrettanto utili ed, ove ciò non fosse possibile, un recupero di energia.

Contrariamente ad altri tipi di rifiuti, 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 ed energia dagli pneumatici fuori uso.

Da ultimo, vi è lo smaltimento in discarica (mista o dedicata) che è stato fino a

tempi molto recenti la principale destinazione degli PFU e lo è tuttora in molte aree geografiche, non necessariamente quelle più arretrate o in via di sviluppo. In Europa il divieto di smaltimento in discarica è stato attuato dal 2003 per gli PFU interi e dal 2006 per gli PFU frantumati. Dal 2006 è, infatti, vietata la messa in discarica degli PFU, ad esclusione degli pneumatici usati come materiale d'ingegneria e quelli con diametro esterno superiore a 1400 mm.

In termini di gestione, obiettivo particolarmente importante che si sono posti consorzi e associazioni di settore è quello di avere un quadro chiaro e completo sui flussi dei pneumatici sia in Europa, sia in Italia. Ciò costituisce, infatti, la premessa per poter effettuare delle corrette valutazioni ed analisi sulla disponibilità dei materiali da valorizzare. Tuttavia, come avviene anche con le diverse tipologie di rifiuti, anche gli pneumatici rientrano spesso nei circuiti della non legalità. È chiaro dunque che conoscere l'esatto quantitativo dei flussi spesso diventa un obiettivo di stima più che un effettivo dato reale.

A livello europeo opera una dozzina di grandi imprese di produzione degli pneumatici, che, articolata su circa novanta stabilimenti produttivi, complessivamente produce circa 355 milioni di pezzi all'anno, ovvero il 24% della produzione mondiale. Sempre a livello europeo, sulla base dei dati del 2009 sono arrivati a fine vita circa 3.2 milioni di tonnellate di pneumatici. Se si sottraggono le quote destinate al riuso, all'export e alla ricostruzione (complessivamente circa il 18%) la quota di PFU generati è risultata pari a 2.6 milioni di tonnellate, di cui circa il 95% è stato avviato a recupero. 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 di valorizzare i

materiali attraverso il riciclaggio. Il problema è oltretutto 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 anni un aumento costante del tasso di raccolta dei PFU, fino a raggiungere percentuali prossime al 95%.

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

- *sistema a tassazione*: 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. Tale sistema vige in Danimarca e Slovacchia;
- *libero mercato*: 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. Tale sistema vige in Austria, Bulgaria, Croazia, Germania, Irlanda, Regno Unito e Svizzera;
- *responsabilità del produttore*: 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". Il sistema vige in Belgio, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Italia, Norvegia, Polonia, Paesi Bassi, Portogallo, Romania, Slovenia, Spagna, Svezia, Turchia, Ungheria.

L'obiettivo comune di tali sistemi è lo smaltimento dei PFU tramite il recupero di materiali ed energia, dal quale si traggono vantaggi ambientali e economici: il riutilizzo di una risorsa non biodegradabile ed ingombrante (infatti andrebbe ad occupare depositi e discariche) arrecherebbe gravi danni all'ambiente e alla salute. I vantaggi consisterebbero nella bonifica di discariche o depositi abusivi; nel risparmio di preziose materie prime, spesso d'importazione; nella riduzione della quantità di rifiuti e conseguentemente minori costi per la collettività; nel miglioramento della bilancia commerciale relativamente a importazione di combustibili tradizionali.

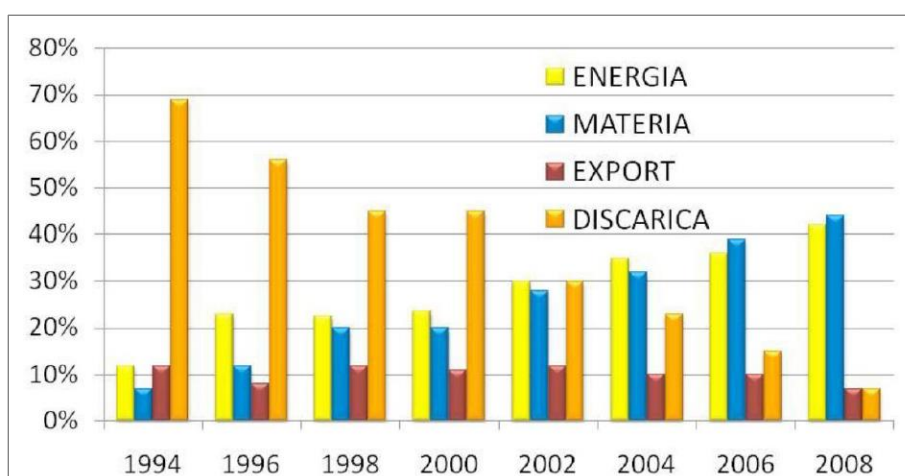


Figura 1.18: Principali utilizzi PFU in Europa (Fonte: ETRMA, 2008).

Nella Figura 1.18 sono mostrati i principali utilizzi dei PFU in Europa dal 1994 al 2008, evidenziando un consistente aumento del recupero di materia, che è passato dal 6% del 1994 a oltre il 40% del 2008.

Per quanto riguarda l'Italia, la quantità annuale degli PFU generati è quasi costante e mediamente è di 350.000 tonnellate. La distribuzione sul territorio degli PFU generati è proporzionale al numero di abitanti dell'area, ovvero al numero di mezzi circolanti su strada: è possibile stimare una produzione media degli PFU pari a 5.5/6 kg per abitante.

Oggi sono circa 30.000 i punti di generazione del PFU, ovvero i luoghi in cui avviene la sostituzione degli pneumatici: rivenditori specializzati, gommisti, stazioni di servizio, officine, sedi di flotte su tutto il territorio nazionale. Migliaia sono poi le aziende autorizzate al prelievo e al trasporto verso i cinquanta impianti di trattamento, siti in cui i PFU vengono preparati per il successivo recupero energetico o di materiale.

RECUPERO	DESTINAZIONE	QUANTITÀ (ton)
Materia	Campi da calcio e altre superfici sportive	26000
	Manufatti	5000
	Ingegneria civile	16000
	Acciaio	16000
	Bitumi	n.d.
	Altro	12000
Energetico	Cementifici	55.000 + 85.000 estero
	Produzione energia elettrica	40000

Tabella 1.7: Principali destinazioni degli PFU in Italia - 2011 [4].

In Tabella 1.7 sono riassunte le principali destinazioni dei PFU in Italia nel 2011. La stima della quantità complessiva dei PFU e derivati in uscita dal Paese nel suddetto anno è pari a 135.000 tonnellate/annue.

Se si considera anche la soluzione del conferimento in discarica, la lettura dei dati assume una connotazione diversa. In Italia, nel 2011, ancora una buona fetta dei PFU (circa il 28%, considerando anche gli PFU dei quali non si conosce la destinazione finale) non ha una destinazione nota o viene smaltita in discarica, in cui in realtà vengono smaltiti solo pochi PFU grandi che sono irrilevanti percentualmente, mentre la grande incertezza del dato è dovuta alla scarsità di informazioni pervenute dagli operatori e dall'estrema frammentazione del mercato (esistono ancora decine di micro-operatori che gestiscono migliaia di tonnellate/annue di PFU al di fuori di qualsiasi schema).

In definitiva, l'assenza di un sistema integrato di gestione a livello nazionale genera una situazione caratterizzata da un mancato controllo sui flussi di questo materiale, da un'insufficiente implementazione di utilizzi di PFU e suoi derivati e dall'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.

1.5 QUADRO NORMATIVO

In questo paragrafo 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.

1.5.1 LEGGI COMUNITARIE E NAZIONALI

Il quadro legislativo comunitario e nazionale si è molto evoluto negli ultimi decenni, 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 si può dare una descrizione sintetica utilizzando quattro strategie operative:

- riduzione della quantità di rifiuti prodotti;
- riutilizzo dei prodotti;
- riciclaggio e recupero dei materiali;
- recupero di energia.

Nel paragrafo seguente sono tratteggiate le principali Direttive della Comunità e dell'Unione Europea destinate a dare esecuzione alle prime tre strategie operative, le quali hanno diretta attinenza con il tema del recupero di materiale nelle costruzioni stradali.

1.5.1.1 UE: Direttive, Normative ed Attività delle Commissioni

La Direttiva 99/31/CE costituisce il punto 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 aree di smaltimento

dei rifiuti adibite al deposito degli stessi sulla o nella terra. Tale Direttiva 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, viene 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.

Essa punta 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 compilato 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 del 2002.

1.5.1.2 Decreto Legislativo 5 Febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi)

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 introdotta nel quadro legislativo italiano una visione del rifiuto non più come termine della catena dei consumi, ma come punto di partenza per cicli produttivi innovativi, in grado di sfruttare le potenzialità di ciascun elemento residuo.

Il principale strumento legislativo del settore è il D. Lgs 5 febbraio 1997, n. 22 (Decreto Ronchi) di attuazione delle direttive suddette, sul quale si basano tutte le attività legislative successive. Esso stabilisce che "la gestione dei rifiuti costituisce attività di pubblico interesse" e deve "assicurare un'elevata protezione dell'ambiente e controlli efficaci". "I rifiuti devono essere recuperati o smaltiti senza pericolo per la salute dell'uomo e senza procedimenti o metodi che potrebbero recare pregiudizio all'ambiente e, in particolare, senza determinare rischi per l'acqua, l'aria, il suolo e per la fauna e la flora, senza causare inconvenienti da rumori o odori, senza danneggiare il paesaggio e i siti di particolare interesse, tutelati in base alla normativa

vigente" [55].

La gestione dei rifiuti si conforma ai principi di responsabilizzazione e di cooperazione di tutti i soggetti coinvolti nella produzione, nella distribuzione, nell'utilizzo e nel consumo dei beni che generano rifiuto. Per il perseguimento di tali obiettivi lo Stato, le Regioni e gli Enti Locali nell'ambito delle opportune competenze adottano ogni azione idonea, avvalendosi di soggetti pubblici e privati qualificati, mediante accordi e contratti di programma.

Le metodologie che favoriscono la riduzione dello smaltimento dei rifiuti sono riportate nell'articolo 4 e sono le seguenti:

- reimpiego e riciclaggio;
- forme di recupero per ottenere materia prima dai rifiuti;
- adozione di misure economiche che prevedano l'impiego dei materiali recuperati dai rifiuti;
- utilizzo dei rifiuti come combustibili o altri mezzi per produrre energia.

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. Nel Capo IV del decreto viene invece definito l'iter da seguire per ottenere l'autorizzazione per la realizzazione e per l'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.

1.5.1.3 Decreto Ministeriale 5 Febbraio 1998 e modifiche successive

Il Decreto del Ministro dell'Ambiente del 5/02/98, con le successive modifiche introdotte dal D.M. 9 Gennaio 2003, dal D.M. 27 Luglio 2004 e dal D.M. 5 Aprile 2006, n. 186, contiene l'elenco delle attività di recupero che, ai sensi degli art. 31 e 33 del D. Lgs 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 autorizzante (novanta giorni e non centocinquanta come previsto 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, così denominati perché se ne 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 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, al punto 7.6, si prevede 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 a freddo [R5];
- b) realizzazione di rilevati, sottofondi stradali (il recupero è subordinato all'esecuzione del test di cessione sul rifiuto 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 varie tipologie di rifiuto. In corrispondenza della voce: "Produzione di conglomerati bituminosi", per la tipologia 7.6 suddetta, comprendente quindi i rifiuti individuati dai codici CER [170302][200301], tale quantità massima risulta fissata in 50.230 ton/annue. Infine sono state riordinate anche le norme riguardanti le terre e rocce da scavo, oggetto di un annoso contenzioso con le autorità comunitarie.

1.5.1.4 Codici CER di interesse per le opere stradali

In questo paragrafo si analizza 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 sono 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 CER (Catalogo Europeo dei Rifiuti). A tale nuovo Elenco dei rifiuti (CER 2002) si fa

esplicito riferimento nelle classificazioni che seguiranno. Si precisa inoltre che l'inclusione di un determinato materiale nell'elenco non attribuisce allo stesso la natura di rifiuto in ogni circostanza, poiché 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 D.Lgs 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 D.M. 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 definito nell'Allegato C della stessa legge (attività di recupero prevista). Inoltre per ciascuna attività di recupero viene segnalato 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 o conglomerato bituminoso di recupero).

I codici CER che individuano i due rifiuti in questione, entrambi appartenenti prevalentemente alla macro-categoria CER 17, sono riportati nella successiva Tabella 1.8.

Si osserva che in Italia nel confezionamento di miscele bituminose non è consentito l'impiego di catrame come legante, 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.

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
17 03 01*		miscele bituminose contenenti catrame di carbone
17 03 02		miscele bituminose diverse da quelle di cui alla voce 17 03 01
(*) subordinato all'esecuzione del test di cessione		

Tabella 1.8: Categorie di rifiuti di interesse per il riciclaggio nelle pavimentazioni stradali.

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.

1.5.1.5 Verifiche di Compatibilità Ambientale

La prescrizione numero 3 della Direttiva sui Materiali da Costruzione della Comunità Europea (89/106/CEE) 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 urbani e speciali e (secondo le caratteristiche di pericolosità) in 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.

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, essendo stato semplificato l'iter burocratico-amministrativo necessario per ottenere le relative autorizzazioni.

É possibile usufruire di queste procedure per:

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

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

Nel caso in esame 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 nel 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 sedici giorni. La concentrazione da confrontare con il limite imposto per ciascuna componente è 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 dal l' 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 con analoghe caratteristiche tecniche.

Il D.M. 5/04/06 ha in parte accolto le suddette critiche, sostituendo il test di cessione “a sedici giorni” con il test riportato nell'appendice A alla norma UNI 10802, secondo la metodica prevista dalla norma: 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 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 EN 12457-2. I risultati delle determinazioni analitiche devono

essere confrontati con i valori limite Tabella 1.9.

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 1.9: Concentrazioni limite di alcuni elementi e composti chimici.

1.5.1.6 Marcatura CE aggregati riciclati e 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 alla marcatura CE degli aggregati naturali o riciclati da impiegarsi nel settore delle costruzioni stradali.

La norma 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 norma 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 norma 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, destinati all’impiego in miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade e altre aree soggette a traffico. Tale norma non si applica all’impiego di conglomerati bituminosi fresati.

Infine la norma EN 12620 “Aggregati per calcestruzzo” specifica le proprietà degli aggregati e del filler ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali o riciclati miscelati per essere utilizzati nel confezionamento 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 poiché definisce la classificazione dei materiali da costruzione per

opere stradali, non più in funzione dell'origine, ma in funzione delle prestazioni tecniche che essi 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 della marcatura CE per i conglomerati bituminosi. Questa nuova serie di norme è stata "costruita" partendo dalla funzione e dalle prestazioni che i materiali devono fornire in opera e non sulla base dei loro costituenti. La serie di norme EN 13108 è stata sviluppata dal Comitato Tecnico CEN/TC 227 "Materiali stradali" e in Italia è cogente dal marzo 2008.

Tra tali norme, di sicuro interesse per il mercato italiano sono:

- *EN 13108-1: Miscela bituminosa - Specifiche del materiale - Parte 1: Conglomerato bituminoso prodotto a caldo;*
- *EN 13108-5: Miscela bituminosa - Specifiche del materiale - Parte 5: Conglomerato bituminoso antisdrucchiolo chiuso;*
- *EN 13108-7: Miscela bituminosa - Specifiche del materiale - Parte 7: Conglomerato bituminoso ad elevato tenore di vuoti;*
- *EN 13108-8: Miscela bituminosa - Specifiche del materiale - Parte 8: Conglomerato bituminoso di recupero.*

In particolare quest'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 *EN 13108-21 "Miscela bituminosa - Specifiche del materiale - Parte 21: Controllo di produzione di fabbrica"* che prevede quale sistema di attestazione quello 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.

1.5.1.7 Testo Unico sull'Ambiente - D.Lgs 3 Aprile 2006, n. 152

La commissione incaricata dal Ministro dell'Ambiente 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 precedentemente disseminate in testi eterogenei, al fine di ridurre 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 le regole 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 (D.Lgs 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 nella 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 preposta 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 materia di autorizzazioni;
 14. adeguamento alle direttive comunitarie della disciplina sulla gestione degli imballaggi;
 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 applichino 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, nell'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 D.Lgs. 152/2006 ai sensi della decisione 2000/532/CE e successive modificazioni.

1.5.1.8 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 (Modulo Unico di Dichiarazione ambientale) 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.).

1.5.1.9 Decreto Legislativo 16 Gennaio 2008, n. 4

Il 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", nel rivisitare completamente la materia in tema di VIA e VAS, apporta sostanziali modifiche alla disciplina delle acque ed a quella 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 degli stessi (articoli 178 e 179) con lo scopo evidente di limitare al massimo la loro produzione e 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.Lgs. 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, riciclo o 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.

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.Lgs. 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 patto che rispettino i seguenti criteri, requisiti e condizioni:

- siano prodotti da un'operazione di riutilizzo, di riciclo o di recupero di rifiuti;
- siano individuate la provenienza, la tipologia e le caratteristiche dei rifiuti dai quali si possono produrre;

- 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;
- 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;
- 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 sia 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 tenendo conto del rapporto tra i

costi e i benefici complessivi. Il sistema, così delineato, segue principi di autosufficienza attraverso lo smaltimento dei rifiuti urbani non pericolosi in ambiti territoriali ottimali, ossia attraverso l'utilizzo degli impianti nel luogo di produzione o raccolta dei rifiuti per limitarne i movimenti sul territorio e la protezione dell'ambiente e della salute mediante il ricorso a tecnologie adeguate;

- evitando 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.Lgs. 4/2008. Nella relazione illustrativa che accompagnava il testo del 2006 è stato specificato che la definizione di "sottoprodotto" veniva adottata in conformità ad una serie di sentenze comunitarie. La definizione originaria 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 ne è destinato l'utilizzo;
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.

1.5.1.10 Pneumatici fuori uso

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 degli pneumatici tal quali mentre, a partire dal 16 luglio 2006, ne esclude il conferimento anche in forma triturata, decretando in questo modo la necessità di attuare concretamente forme idonee di trattamento e recupero degli stessi 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.Lgs. 209/2003) e quelle generali di cui agli articoli 179 e 180, allo scopo di ottimizzarne il recupero e ridurre la produzione 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.Lgs. 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).

1.5.2 INCENTIVI AL RECUPERO

1.5.2.1 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.

1.5.2.2 Decreto del Ministro dell'Ambiente 203/2003

L'art. 3, comma 3 del DM 203/2003 (Repertorio di Riciclaggio) 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).

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;
- nomina di 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.

È stato necessario perciò 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 iscrivibilità nel Repertorio del Riciclaggio e le condizioni minime che permettono di rispettare i seguenti requisiti limite, in termine di massa, 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 tradurre considerazioni di opportunità e di cautela rispetto alla qualità dei beni ed al buon risultato 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 15/07/2005 pubblicata sulla GU n. 171 del 25 luglio 2005);
- 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.

1.5.2.3 Circolare n. 5205 del 15 Luglio 2005

La Circolare n. 5205 del 15 Luglio 2005, pubblicata in GU n. 171 del 2005, 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 alla 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 massa, 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.

1.5.2.4 Circolare del 19 Luglio 2005

La Circolare del 19 Luglio 2005, pubblicata nella GU n. 173 del 27 Luglio 2005, 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%.

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

A queste ultime, infatti, è richiesta una ulteriore condizione rappresentata dall’adozione di apposite disposizioni da parte della Regione competente come previsto dall’art. 19, comma 4 del DLgs. 22/97 precedentemente citato.

1.5.2.6 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 consentano 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 attua concretamente 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 2:

RICICLAGGIO A FREDDO

2.1 RICICLAGGIO DELLE PAVIMENTAZIONI

Oggi, più che in passato, la conoscenza dei benefici che il riciclaggio in impianto ed in sito può fornire in termini di recupero di materiale, costi di trasporto ed energia coinvolge tutti i fattori che influenzano il ciclo di vita del prodotto finale. Tutti i recenti studi effettuati sulle pavimentazioni realizzate con leganti idraulici (cemento) o idrocarburici (bitume) mostrano l'importanza del riciclaggio al fine di avere una pavimentazione stradale che duri nel tempo e che sia eco-sostenibile.

Dunque, se si volesse dare una definizione di pavimentazione efficiente e duratura, si potrebbe utilizzare la seguente: "Una pavimentazione sicura ed efficiente, rispettosa dell'ambiente e che risponda alle esigenze degli utenti attuali senza compromettere quelle delle generazioni future". Per rispettare tale definizione, nella progettazione o riqualificazione di una pavimentazione sarà necessario raggiungere i seguenti obiettivi:

- ottimizzazione dell'uso delle risorse naturali e riduzione del consumo di

energia;

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

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

- *economiche*: in particolare si fa riferimento alla scarsità di aggregati vergini e materiale naturale, soprattutto in prossimità delle aree urbane. A questo bisogna aggiungere la crescente difficoltà nell'aprire nuove cave o siti di estrazione; infine bisogna tener conto del costo dell'energia.
- *sviluppo di nuove tecnologie e mezzi*: le tecniche di riciclaggio, siano esse applicate in sito o in impianto, a caldo o a freddo, hanno permesso lo sviluppo di nuovi approcci costruttivi in cui è previsto l'uso di risorse che in passato erano semplicemente considerate scarti da smaltire in discarica. Inoltre hanno favorito lo sviluppo di tecnologie innovative in grado di permettere l'applicazione delle tecniche suddette.
- *ragioni legali*: il riciclaggio totale o parziale di una pavimentazione è entrato a far parte di quelle alternative previste dalla normativa.

Il fresato o conglomerato bituminoso di recupero è considerato il protagonista principale delle tecnologie di riciclaggio. Come illustrato nel paragrafo 1.3, esso 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 quindi valorizzato e riutilizzato. Dal punto di vista economico la sostituzione, pur se parziale, degli aggregati naturali i cui costi diventano continuamente più onerosi risulta sempre più vantaggiosa economicamente; ciò è anche rafforzato dal fatto che tramite sperimentazioni, sia in laboratorio sia in sito, è possibile valutarne le qualità e le quantità ottimali per il loro impiego nella costruzione di infrastrutture viarie.

In questa sede sarà esaminato più dettagliatamente il riciclaggio a freddo ed in particolare quello con emulsione bituminosa e cemento (Capitolo 3); tale tecnica sarà infatti centrale nel programma sperimentale di laboratorio e sarà utilizzata in abbinamento al polverino di gomma da PFU per il confezionamento di miscele, allo scopo di valutarne la compatibilità per un uso congiunto nelle operazioni di riciclaggio del settore stradale.

Per completezza di trattazione di questa materia, si ritiene necessario fornire alcune indicazioni generali sui diversi metodi di riciclaggio.

2.1.1 METODI DI RICICLAGGIO

Le soluzioni di riciclaggio nell'ambito delle pavimentazioni stradali possono essere distinte in due categorie:

- *riciclaggio in impianto fisso*: gli impianti fissi utili a tale funzione si distinguono in impianti di produzione del conglomerato bituminoso a caldo, sia continui sia discontinui, opportunamente costruiti e resi atti al riutilizzo

del fresato in impianti di produzione specifici per il riciclaggio a freddo, oppure in impianti per la produzione di misto cementato opportunamente modificati;

- *riciclaggio in sito*: appositi treni di riciclaggio consentono di riciclare la pavimentazione stradale direttamente sul posto, sia a caldo, sia a freddo.

Nel caso di riciclaggio in impianto fisso il materiale fresato dalla pavimentazione deve essere trasportato dal luogo di recupero all'impianto stesso per poi essere inserito nel ciclo produttivo e quindi riutilizzato.

I principali vantaggi del riciclaggio in impianto fisso sono i seguenti:

- alta qualità tecnica del processo di riciclaggio: la frantumazione, la setacciatura e la miscelazione degli aggregati risultano essere migliori; in aggiunta, si ha la possibilità di approfondire l'analisi tramite prove di laboratorio e controlli di qualità, sia sul materiale fresato, sia sul prodotto finale;
- il prodotto finale risulta essere più omogeneo e controllato; inoltre si ha la possibilità di uno stoccaggio temporaneo;
- si ha una maggiore flessibilità in termini di produzione di miscele differenti e dal punto di vista operativo.

Parallelamente ai vantaggi illustrati, sono da menzionare i difetti della tecnica di riciclaggio in impianto fisso:

- maggiori costi logistici, poiché il materiale deve essere trasportato dal cantiere operativo all'impianto fisso e riportato nel cantiere di destinazione finale, una volta realizzata la miscela;
- maggiori costi di stoccaggio e gestione del materiale in cantiere;

- nonostante un maggiore controllo della miscela, vi è l'impossibilità di realizzare miscele con percentuali di riutilizzo del RA superiori al 50-60%;
- maggiore impatto sul traffico veicolare in prossimità del cantiere.

Nel riciclaggio in sito tali svantaggi sono notevolmente ridotti: i costi di trasporto e gestione del materiale fresato sono limitati al minimo, così come l'impatto sulla viabilità e la logistica in prossimità del cantiere e si può arrivare a riciclare fino al 100% di materiale fresato. I vantaggi appena menzionati rendono il riciclaggio in sito una delle alternative di intervento più appetibili.

Sia il riciclaggio in impianto fisso che in-sito, a loro volta, possono essere suddivisi in due sottocategorie distinte, in base alla temperatura di lavorazione dei componenti. In particolare si distinguono le seguenti tecniche:

- *riciclaggio a caldo*: con riscaldamento degli elementi;
- *riciclaggio a freddo*: senza riscaldamento degli elementi.

2.1.1.1 Riciclaggio in impianto fisso a caldo

Nel trattamento di riciclaggio in impianto fisso a caldo, il fresato viene trasportato all'impianto del conglomerato a caldo e inserito nel processo di produzione della nuova miscela, mescolandolo con aggregati vergini, bitume (tradizionale o modificato) ed eventualmente con un rigenerante che agisca sul bitume invecchiato.

Il RA, prima di essere inserito nel processo di produzione, è asciugato e riscaldato alla temperatura di miscelazione opportuna. Queste operazioni di essiccamento e riscaldamento presentano i seguenti vantaggi:

- nella miscela non è presente acqua residua che possa intaccare i fenomeni

di adesione e coesione del nuovo bitume;

- è favorito il rammollimento del bitume del fresato e con esso le operazioni di rigenerazione.

Questa tipologia di miscela è confezionata in impianti fissi di produzione che, tramite un corretto dosaggio dei componenti, permettono di realizzare prodotti con caratteristiche note; la tecnica è senza dubbio quella che conferisce prestazioni più elevate al conglomerato riciclato e che lo rende idoneo per ogni tipo di impiego, dallo strato di base a quello di usura.

2.1.1.2 Riciclaggio in impianto fisso a freddo

Per riciclaggio a freddo in impianto s'intende la tecnica che permette il riutilizzo del conglomerato bituminoso senza che questo debba essere preventivamente riscaldato ma, al contrario, esso viene addizionato alla miscela a temperatura ambiente.

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

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

2.1.1.3 Riciclaggio in sito a caldo

Per riciclaggio in sito a caldo s'intende la tecnica che prevede il riutilizzo del materiale fresato, opportunamente riscaldato, direttamente sul posto mediante appositi "treni di riciclaggio".

Le fasi principali del riciclaggio in sito a caldo sono:

- la scarifica della pavimentazione, preriscaldata o meno, fino alla profondità desiderata;
- la raccolta del fresato tramite un'unità mobile che comprende tutta la filiera di produzione della nuova miscela, compreso il silos di stoccaggio del nuovo bitume. Come nel caso degli impianti fissi, il materiale raccolto viene asciugato e riscaldato fino ad una temperatura di 140-170°C;
- l'aggiunta di materiali vergini, legante ed eventuali inerti di correzione;
- la stesa della miscela per tutta la larghezza dell'area d'intervento attraverso una classica vibrofinitrice;
- la compattazione della miscela secondo i metodi tradizionali.

2.1.1.4 Riciclaggio in-sito a basse temperature (tiepido e semitiepido)

La tecnica del riciclaggio a basse temperature è di nuova concezione ed è stata applicata solo più recentemente. Essa è caratterizzata da temperature di lavorazione della miscela comprese nell'intervallo 80÷90 °C per il semitiepido e 110÷130 °C per il tiepido. Tali temperature consentono quindi l'uso di bitume schiumato ed emulsioni bituminose. I treni di riciclaggio possono essere adattati per l'utilizzo di entrambi i leganti, i quali sono iniettati nella parte posteriore del tamburo e mescolati con il fresato preriscaldata.

I principali vantaggi di entrambe le tecniche (tiepido e semitiepido) sono i seguenti:

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

La miscela che si ottiene risulta avere una buona lavorabilità e consente di ridurre i tempi di attesa per la riapertura al traffico della strada.

2.1.1.5 Riciclaggio in sito a freddo

Il riciclaggio a freddo in sito si realizza con macchine stabilizzatrici che consentono di demolire e miscelare i materiali della pavimentazione esistente, anche in un'unica passata. Possono essere interessati solo gli strati in conglomerato bituminoso e/o quelli sottostanti, in funzione delle finalità dell'intervento. Rispetto a tutte le altre tecniche di riciclaggio è quella che realizza il maggiore risparmio energetico, poiché non richiede il riscaldamento dei componenti della miscela, né del trasporto dei materiali da e per il cantiere.

Le tecniche di riciclaggio a freddo saranno ampiamente illustrate nel prosieguo del capitolo.

2.1.2 SCELTA DELLA SOLUZIONE D'INTERVENTO

Negli interventi di riciclaggio, in genere non esiste una soluzione universalmente valida. Tutto dipende dalle singole situazioni che il tecnico trova in

sito, dalle condizioni della pavimentazione, dal tipo di problema che essa presenta, dalla reperibilità o meno di materiale vergine, dalla disponibilità economica della committenza. Dal punto di vista tecnologico, tra i vari parametri che influenzano la scelta della soluzione di riciclaggio si ricordano i seguenti:

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

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

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

- assenza dei costi di trasporto;
- assenza di aree di stoccaggio del fresato;
- minore influenza del cantiere sul normale deflusso del traffico veicolare; ciò si traduce in un minor consumo d'energia da parte degli utenti e dunque

della comunità e anche in una riduzione del tempo di congestionamento del traffico.

2.2 TECNICHE DI RICICLAGGIO A FREDDO

Le tecniche di riciclaggio a freddo, come anticipato sopra, consentono il riutilizzo del conglomerato bituminoso di recupero a temperatura ambiente, ossia senza che questo debba essere preventivamente riscaldato. Il riciclaggio a freddo può essere eseguito in impianto, trasportando il materiale recuperato dalla strada esistente a un centro di raccolta, o in sito. Il processo in impianto è generalmente l'opzione più costosa in termini di esborso per metro cubo di materiale processato, in funzione soprattutto di costi di trasporto e logistici coinvolti, assenti invece nel caso di trattamento in loco.

Laddove sia possibile, il riciclaggio in sito è sempre il metodo preferito, principalmente per i vantaggi economici che offre. Tuttavia, è vero che il binomio a freddo-in sito non consente, in genere, di ottenere materiali di riciclo che possano essere applicati in superficie, ciò a causa delle difficoltà nel controllo delle miscele e delle curve granulometriche. Per tale motivo il processo di riciclaggio a freddo in sito è spesso identificato più precisamente con il nome di “stabilizzazione bituminosa a freddo” (*BSM Bitumen Stabilised Materials*).

2.2.1 MATERIALI STABILIZZATI A BITUME

Il riciclaggio a freddo può essere realizzato impiegando due diverse forme di

legante bituminoso: emulsione bituminosa o 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 dello Iowa) che la concepì più di quaranta 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 fase di schiumatura (occorre che il bitume venga lavorato a 160-180°C) e che, quindi, il termine "a freddo" debba essere attribuito più correttamente alla miscela di aggregati.

Numerose esperienze in sito hanno mostrato come il riciclaggio a freddo con emulsione polimerica risulti efficace, a condizione che si consegua l'eliminazione del contenuto d'acqua residuo esistente 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.

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 sito), 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 RA 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.

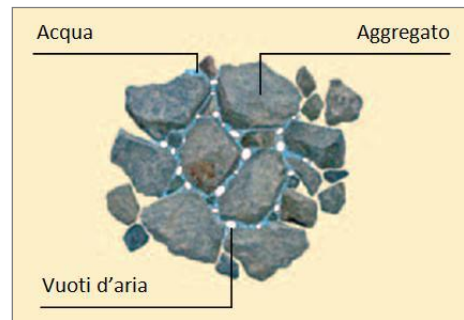
Se da un lato i conglomerati bituminosi a freddo con RA ben si prestano per interventi di risagomatura e riprofilatura di pavimentazioni con degradazioni superficiali, le stabilizzazioni bituminose in sito restituiscono materiali impiegabili con successo negli strati più profondi del pacchetto stradale.

È importante sottolineare che i conglomerati bituminosi sono fondamentalmente differenti dai materiali stabilizzati a bitume (*Bitumen Stabilised Material* 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, poiché il bitume ricopre solo parzialmente gli aggregati.

La matrice di un BSM è mista, presentando una risposta dipendente dai carichi applicati simile a quella del materiale granulari e una dipendenza dalla frequenza di carico simile al conglomerato bituminoso. 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.

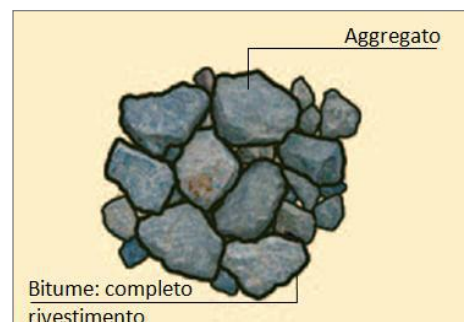
Si riportano di seguito alcune considerazioni circa la risposta di uno strato della pavimentazione ad un carico imposto, in relazione alle proprietà del materiale costituente ed alle caratteristiche della sollecitazione (ampiezza, frequenza, ecc.).

- **Materiali non legati (granulari)**, che includono roccia frantumata e ghiaia, trasferiscono il carico applicato attraverso le particelle singole o la matrice litica. 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 addensamento, con un orientamento ed un avvicinamento progressivo tra le particelle. Questo può accadere a qualsiasi livello della struttura stradale, con la conseguenza di deformazioni risultanti sulla superficie. Tali deformazioni si manifestano solitamente come disconnessioni di ampio raggio lungo il percorso degli pneumatici.

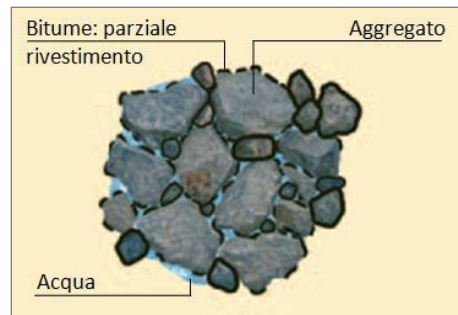
- **Materiali legati**, che includono conglomerato bituminoso e materiali stabilizzati (cementati), sono caratterizzati da un materiale legante che unisce le particelle con continuità.



Essi agiscono analogamente 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, con valori massimi agli estremi della sezione. Lo stato di sollecitazione risultante, in particolare quello di trazione al lembo inferiore, possono generare un meccanismo di rottura per fatica dopo numerosi cicli di carico. Le fessurazioni si sviluppano

all'estremità inferiore dello strato e si propagano poi verticalmente col susseguirsi dei cicli di sollecitazione.

- **Materiali legati in modo non continuo**, in cui ricadono i materiali stabilizzati a bitume (*Bitumen Stabilised Material*, BSM), si comportano in maniera simile a quelli granulari con la



conservazione di un certo attrito interparticellare ma con aumentata coesione e rigidità. I materiali stabilizzati a bitume, a differenza di quelli a cemento, sono meno rigidi ma esibiscono migliore resistenza a taglio. Il principale meccanismo di rottura di tali materiali è la deformazione permanente. Sotto una certa percentuale di bitume, variabile dal 3% al 5% in funzione degli aggregati e delle loro proprietà, questi materiali non sono soggetti a incrinature da fatica, essendo legati in modo discontinuo. In questa tipologia di materiali, infatti, il bitume risulta disperso in modo non continuo e il fenomeno della fatica non rientra perciò tra i fattori determinanti per la progettazione.

Il tipo di legante utilizzato è quindi uno dei fattori determinanti per il numero di cicli di carico che uno strato può sopportare, prima che si manifestino deformazioni o lesioni. Questo aspetto è vero per tutti i tipi di materiale, sia per i conglomerati bituminosi, sia per quelli stabilizzati.

Riguardo a questi ultimi, in genere la resistenza acquisita dallo strato è principalmente determinata dalle caratteristiche della sostanza stabilizzante aggiunta, ma allo stesso tempo varia in base al tipo di materiale trattato. In genere,

l'aggiunta di una quantità superiore di sostanza stabilizzante allo scopo di ottenere una maggiore resistenza, può produrre l'effetto contrario, riducendone le prestazioni. È quindi fondamentale che i requisiti di efficienza dello strato stabilizzato siano chiaramente indicati e che sia condotto uno studio adeguato delle miscele su campioni rappresentativi, allo scopo di determinare la percentuale di applicazione ottimale.

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. Il grafico illustrato in Figura 2.1 aiuta a comprendere i tipici meccanismi di rottura dei materiali riciclati a freddo, inclusi i BSM.

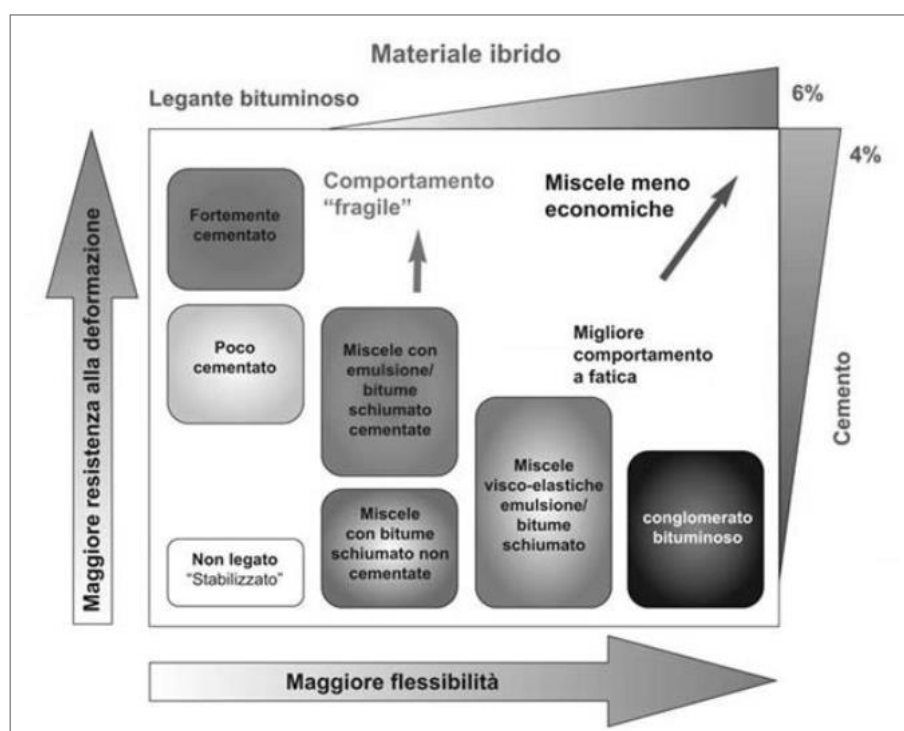


Figura 2.1: Influenza del legante bituminoso e cementizio sul comportamento dei BSM.

In conclusione, in Tabella 2.1 si confrontano le principali caratteristiche dei

trattamenti con emulsione bituminosa, bitume schiumato e tradizionale a caldo.

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 2.1: Confronto tra diverse tecniche di intervento.

2.2.2 STABILIZZAZIONE CON EMULSIONE BITUMINOSA

L'emulsione bituminosa è composta da due liquidi immiscibili: emulsione ed acqua. Essi 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 per mezzo delle molecole ionizzate dell'emulsionante.

Le emulsioni bituminose sono state originariamente sviluppate per superare le

difficoltà tipiche di tutte le miscele che prevedono l'impiego di bitume caldo; esse 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.

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

Una degli aspetti chiave affinché il bitume rivesta e leghi adeguatamente gli inerti è la cosiddetta fase di *rottura* dell'emulsione, consistente nella separazione del bitume dall'acqua e nella coalescenza delle sue goccioline per formare una pellicola continua che si deposita 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 condizione di rottura e il successivo controllo della presa assumono quindi grande importanza per ottenere le prestazioni desiderate dalla miscela.

I fattori che influenzano la rottura e la successiva presa sono i seguenti:

- 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;
- il tipo e la qualità di emulsione: maggiori concentrazioni di molecole di emulsionante ionizzate producono emulsioni più stabili;
- le forze meccaniche causate dal pompaggio, dal costipamento e dal traffico veicolare;
- la composizione minerale degli aggregati: la velocità di presa può essere influenzata dalle interazioni fisico-chimiche tra l'emulsione e la superficie degli aggregati;
- l'intensità della carica elettrica degli aggregati in relazione a quella dell'emulsione;
- la temperatura degli aggregati e dell'aria: il calore è un catalizzatore delle reazioni chimiche e provoca una più rapida dissipazione ed evaporazione dell'acqua;
- la percentuale e il tipo di filler attivo, ossia la quantità di cemento o calce.

Sebbene per il riciclaggio si possano utilizzare sia le emulsioni anioniche sia quelle cationiche (in funzione della carica elettrostatica), queste ultime si prestano molto bene nel riciclaggio in profondità, poiché sono caratterizzate da una rapida velocità di rottura.

Per la realizzazione degli strati di fondazione, in genere insieme all'emulsione bituminosa, nella miscela viene addizionata una percentuale di cemento che

contribuisce a migliorare le proprietà meccaniche e ad incrementare la resistenza all'umidità; in aggiunta, esso agisce come una sorta di catalizzatore, controllando la rottura dell'emulsione e aumentando le proprietà di resistenza iniziale della pavimentazione. Si illustrerà più dettagliatamente quest'ultimo tipo di stabilizzazione nel capitolo 3.

Nella Tabella 2.2 si riassumono i principali vantaggi e svantaggi di una stabilizzazione con emulsione di bitume.

EMULSIONE BITUMINOSA	
Vantaggi	Svantaggi
<p>Flessibilità: la stabilizzazione con bitume forma un materiale visco-elastico con caratteristiche a fatica superiori alla media, (coesione e resistenza alla deformazione).</p> <p>Facilità di applicazione: la riciclatrice è collegata al serbatoio e il bitume è iniettato con una barra sprezzatrice.</p> <p>Accettate facilmente: le emulsioni bituminose sono ben conosciute nel settore dell'edilizia. Sono generalmente disponibili metodi standard di controllo e specifiche tecniche.</p>	<p>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.</p> <p>Il contenuto di umidità del materiale nella pavimentazione esistente a volte è troppo elevato e si satura con l'aggiunta di emulsione.</p> <p>La maturazione può richiedere molto tempo. L'aumento della resistenza dipende dalla perdita di umidità.</p> <p>Reperibilità: la formulazione richiesta per il riciclaggio non sempre è disponibile.</p>

Tabella 2.2: Vantaggi e svantaggi della stabilizzazione con emulsione bituminosa.

2.2.3 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 dello Iowa iniettò con successo del vapore nel bitume, allo scopo di creare una massa schiumosa. L’invenzione fu indotta dall’abbondanza di materiali scadenti presenti sul territorio e dalla mancanza 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 applicazioni in sito a causa della necessità di disporre di speciali attrezzature per il confezionamento delle miscele, quali ad esempio le caldaie a vapore; essa inoltre trovava una scarsa applicazione su scala mondiale, soprattutto a causa dei vincoli imposti dai diritti d’autore sugli iniettori della schiuma. Con la prescrizione dei diritti d’autore negli anni novanta ci fu un notevole aumento di interesse nei confronti di questa tipo di stabilizzazione.

La tecnica prevede che il bitume caldo (160-180°C) si trasformi in una sostanza schiumosa quando in un’apposita camera di espansione esso viene miscelato con una piccola quantità di acqua fredda (di norma il 2% in massa del bitume). Il processo di schiumatura dipende quindi dal fatto che l’acqua cambi il suo stato di aggregazione da liquido a gassoso. Quando le particelle vengono a contatto con il bitume caldo l’energia termica del bitume è trasmessa all’acqua. Non appena la temperatura dell’acqua raggiunge il punto di ebollizione, essa cambia stato, creando una bolla piena di vapore acqueo e ricoperta da una pelle sottile di bitume (Figura 2.2).

Alle normali pressioni atmosferiche tale processo è accompagnato da un’espansione di circa 15-20 volte il volume originario del bitume. Allo stato

schiumato (uno stato temporaneo di bassa viscosità) il bitume può essere quindi aggiunto e mescolato con aggregati a temperatura ambiente e con un loro contenuto d'umidità caratteristico.

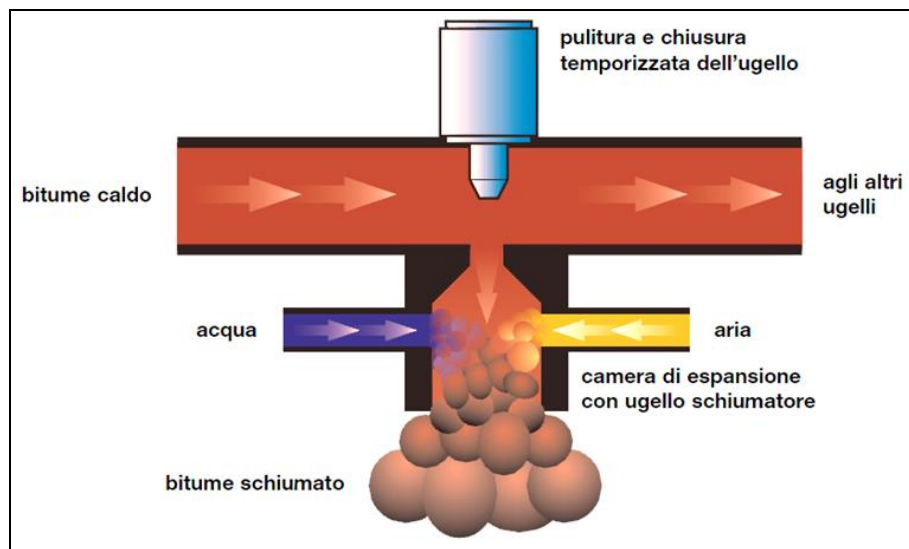


Figura 2.2: Schema del processo di espansione del bitume.

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

Così come avviene per la stabilizzazione con emulsioni bituminose, anche nel caso del bitume schiumato possono venire aggiunte piccole quantità di cemento o calce. Oltre a migliorare la capacità di mantenimento della resistenza dopo il contatto con l'acqua, tale filler attivo aiuta la dispersione del bitume aumentando la frazione di materiale inferiore a 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:

- *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 rispetto al volume del bitume non schiumato;

- *tempo di dimezzamento*: è una misura della stabilità della schiuma e fornisce un'indicazione sulla velocità di collasso della stessa. 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 2.3).

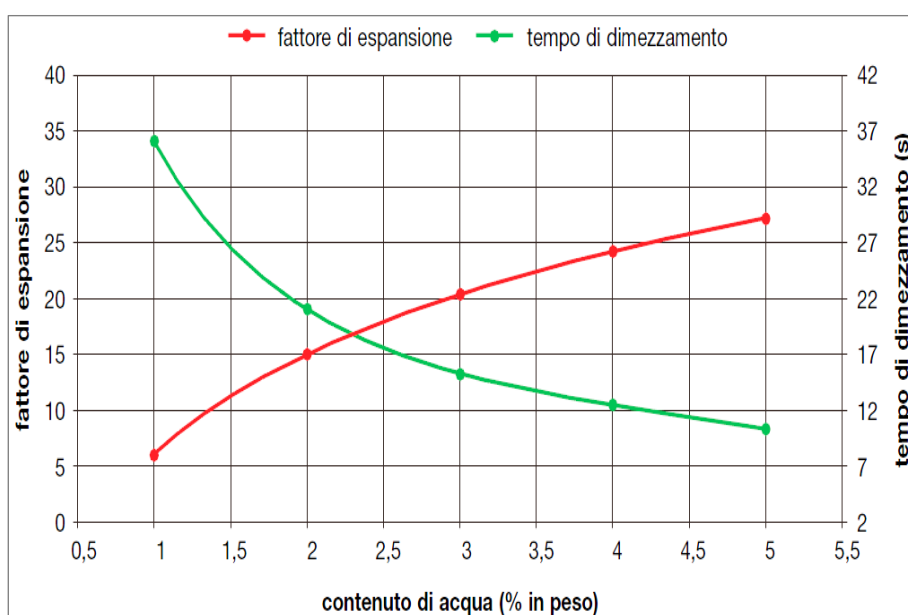


Figura 2.3: Parametri per valutare la qualità del bitume schiumato.

Queste due caratteristiche sono influenzate dai seguenti fattori:

- *acqua di aggiunta*: aumentando la quantità d'acqua iniettata nel bitume, il volume della schiuma prodotta aumenta, ossia 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 utilizzati bitumi aventi indici di penetrazione compresi tra 80 e 150 dmm, benché in passato siano stati usati con successo anche bitumi più rigidi soddisfacenti i requisiti minimi necessari per le proprietà schiumogene;
- *provenienza del bitume*: alcuni tipi di bitume schiumano meglio di altri in funzione della loro composizione;
- *temperatura del bitume*: la viscosità del bitume è inversamente proporzionale alla temperatura; quanto più bassa è la viscosità, maggiore è la temperatura e di conseguenza sono maggiori le bolle che si formeranno;
- *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, con un conseguente miglioramento dell'omogeneità della schiuma;
- *additivi*: sul mercato ci sono molti prodotti che influenzano le proprietà schiumogene.

Nella Tabella 2.3 si riassumono i principali vantaggi e svantaggi di una stabilizzazione con bitume schiumato.

BITUME ESPANSO	
Vantaggi	Svantaggi
<p>Pavimentazione flessibile e resistente: il materiale trattato con bitume espanso presenta una malta flessibile che lega le particelle più grosse. Ha quindi una resistenza alla deformazione e a fatica superiore alla media.</p> <p>Facilità di applicazione: la riciclatrice è collegata al serbatoio e il bitume è iniettato con uno speciale tipo di barra sprezzatrice.</p> <p>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.</p> <p>Tasso di aumento della resistenza: il materiale può sopportare il carico del traffico subito dopo la posa.</p>	<p>Il processo di espansione richiede un bitume molto caldo, al di sopra dei 160 °C. Ciò richiede un'attrezzatura speciale dotata di determinate misure di sicurezza.</p> <p>Qualità del bitume: la qualità del materiale stabilizzato è determinata dalle caratteristiche schiumogene che dipendono ampiamente dal bitume.</p> <p>Tipo di materiale e condizioni: il materiale saturo e quello caratterizzato da una carenza di fini non possono essere trattati con bitume espanso</p>

Tabella 2.3: Vantaggi e svantaggi della stabilizzazione con bitume espanso.

2.2.4 COMPONENTE FLUIDA NEI BSM

Il ruolo dell'umidità nei materiali stabilizzati sia con emulsione di bitume, sia con bitume schiumato, presenta delle similitudini sotto molti aspetti, pur permanendo alcune differenze sostanziali. Quando si parla di fase liquida della

miscela BSM, o contenuto totale di fluido, devono essere valutati sia il contenuto d'acqua (umidità), sia la componente bituminosa. Nella Tabella 2.4 è illustrato il ruolo di entrambi gli elementi, bitume e umidità, in relazione al tipo di stabilizzazione, con emulsione di bitume o con bitume schiumato.

RUOLO DEI FLUIDI NEI BSM		
Componente	BSM-emulsione	BSM-schiumato
Bitume	Contribuisce alla fase liquida per la compattazione	Contributo trascurabile alla fase liquida 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 presa e riduce la resistenza iniziale	Riduce la resistenza iniziale
	Permette la lavorabilità dei 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 2.4: Ruolo delle componenti fluidi nei materiali stabilizzati a bitume (BSM).

La Figura 2.4 riporta la variazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali stabilizzati a bitumi nelle due diverse forme con il variare del contenuto di umidità nel tempo. Il grafico evidenzia che, al diminuire del contenuto di umidità nel tempo, le proprietà meccaniche sviluppate dalla miscela tendono progressivamente ad aumentare; la velocità con cui ciò si verifica è dipendente anche dal tipo di legante.

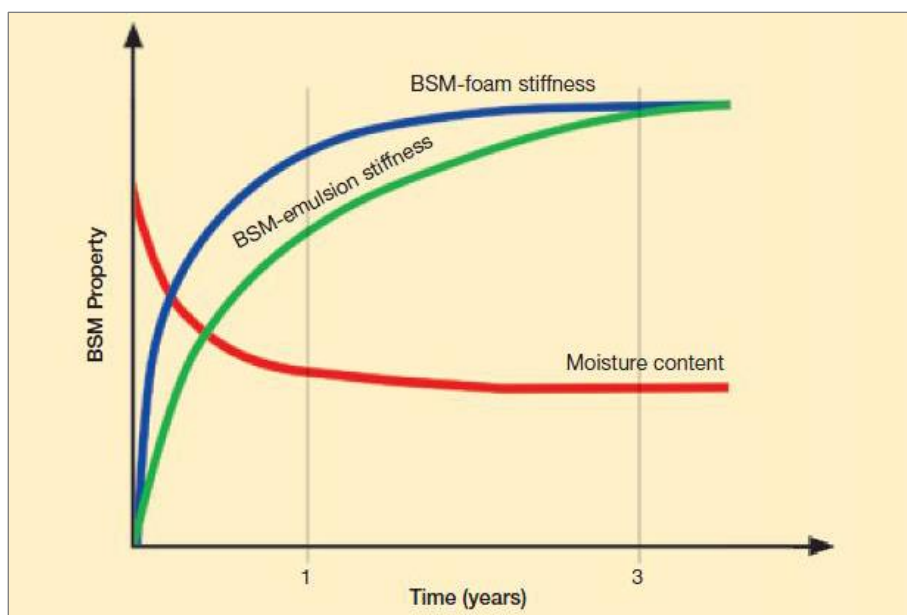


Figura 2.4: Variazione caratteristiche meccaniche dei BSM in funzione dell'umidità nel tempo.

2.3 RICICLAGGIO A FREDDO IN SITO

Il riciclaggio a freddo trova nell'esecuzione in sito la sua espressione più tipica. Al fine di confezionare un prodotto di qualità occorre adottare una corretta tecnica di demolizione e miscelazione della preesistente pavimentazione stradale, utilizzando macchinari appositamente studiati per questi impieghi.

In passato tali mezzi fornivano ridotte produzioni orarie (sotto le 50 t/h) e non consentivano di realizzare conglomerati bituminosi che possedessero caratteristiche uniformi all'interno di una stessa stesa (erano originariamente destinati ad altre funzioni e riadattati per il 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 sito” possono lavorare a profondità che superano i 300 mm, frantumare e utilizzare il 100% del materiale presente in loco e produrre una miscela dalle qualità comparabili a quelle relative ai processi in impianto, operando su una larghezza di circa 2 m: in pratica, con 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 sito 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. 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 sito, ma non sempre confrontabili perché condizionate dalle specifiche modalità di esecuzione.

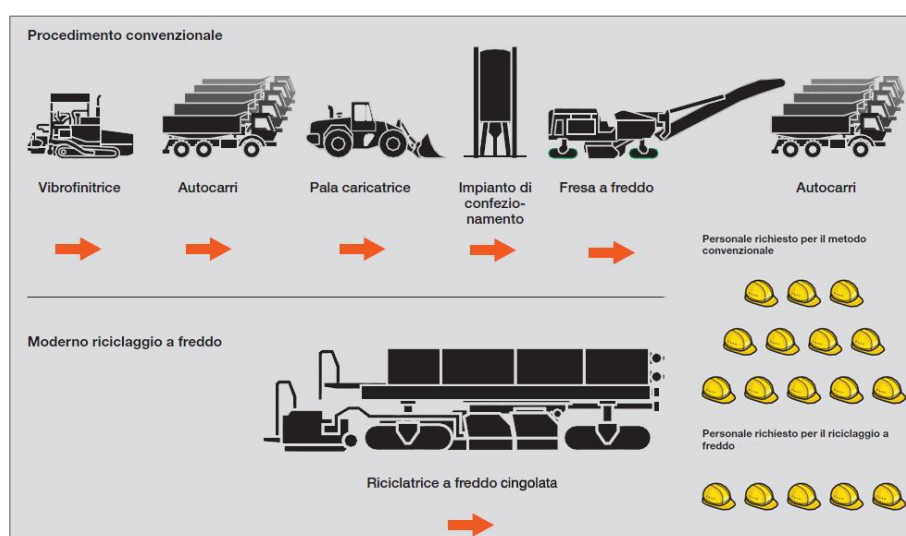


Figura 2.5: Confronto tra procedimento convenzionale e moderno di riciclaggio a freddo.

Le moderne tecnologie di riciclaggio a freddo in sito consentono di ottenere in un'unica passata tutto ciò che un tempo veniva realizzato laboriosamente tramite una serie di onerose operazioni distinte, come illustrato in Figura 2.5. I vantaggi economici derivanti dalla riduzione al minimo sia del numero delle macchine utilizzate, sia dei costi della manodopera, unitamente al considerevole risparmio di tempo, costituiscono il grande punto di forza che ha consentito una crescente diffusione della tecnica.

Con queste caratteristiche le riciclatrici hanno offerto agli ingegneri stradali un più ampio campo di possibilità, tra cui la più importante è la realizzazione di spessi strati monolitici di materiale stabilizzato. Da un punto di vista strutturale, un singolo strato di 300 mm di spessore di materiale stabilizzato possiede una capacità di carico ben superiore a quella di due strati di 150 mm di spessore, separati e sovrapposti (Figura 2.6).



Figura 2.6: Comportamento tra multistrato e strato spesso di materiale legato.

Per quanto riguarda i campi di utilizzo, la tecnica di riciclaggio a freddo costituisce un'alternativa valida alla ricostruzione con rimozione dei materiali nelle seguenti applicazioni, distinte in base alla finalità dei lavori:

- stabilizzazione della base granulare di pavimentazioni flessibili insieme agli strati superficiali bituminosi danneggiati per la realizzazione di uno strato di base di materiale trattato, con capacità strutturale incrementata;
- riciclaggio di strati bituminosi superiori ammalorati per “fatica” per la realizzazione di un nuovo strato di base;
- riciclaggio dello strato superficiale e di alcuni centimetri dello strato di base di pavimentazioni semirigide 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.

2.3.1 VANTAGGI E SVANTAGGI

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 i seguenti:

- *assenza di asporto di materiale*: grazie al riciclaggio del fresato non sono necessari trasporti fino alla discarica ma solo, eventualmente, piccoli spostamenti all’interno del cantiere;
- *assenza di smaltimento di materiale*: il materiale di recupero non asportato non deve essere smaltito. Questo è particolarmente importante nel caso in cui il conglomerato 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 totale assenza di materiali vergini*: il riutilizzo del materiale 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 nell'ambiente non vengono emanate sostanze nocive;
- *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 quella 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 materiale a temperatura ambiente, non si rilasciano né fumi, né 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 alla lavorazione e per gli abitanti locali;
- *limitazione dei tempi di chiusura al traffico*: il riciclaggio in sito in genere (sia a caldo, sia a freddo) consente di ridurre i tempi di chiusura delle arterie soggette a rifacimento; inoltre il riciclaggio a freddo non necessita di tempi di raffreddamento del conglomerato steso a caldo. Nel caso di riciclaggio in centrale, il continuo transito dei mezzi che riforniscono il cantiere di materie prime si somma al traffico ordinario, generando ritardi nei rifornimenti; tali ritardi 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 ad aggiungersi un maggiore pericolo per gli operatori e per l'utenza della rete viaria;

- *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 operare anche su strade provinciali, comunali e consortili, oltre che sulle autostrade.

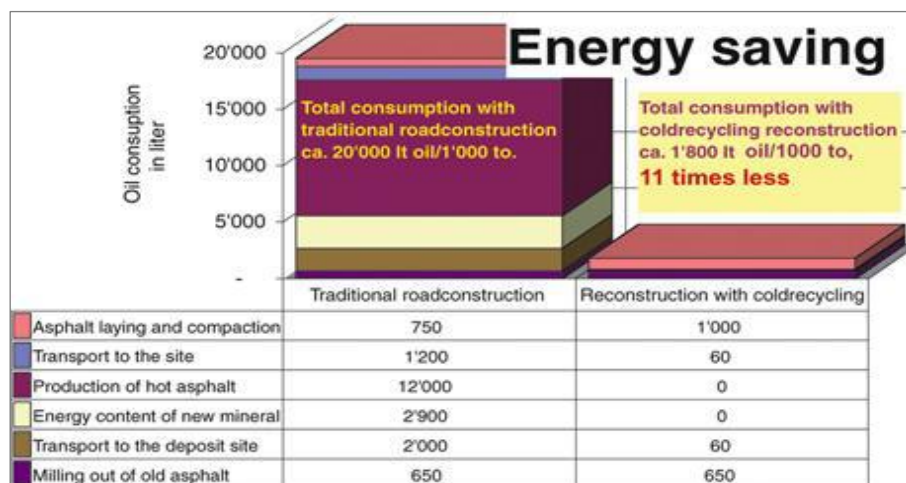


Figura 2.7: Consumo energetico per tecniche tradizionali e riciclaggio a freddo.

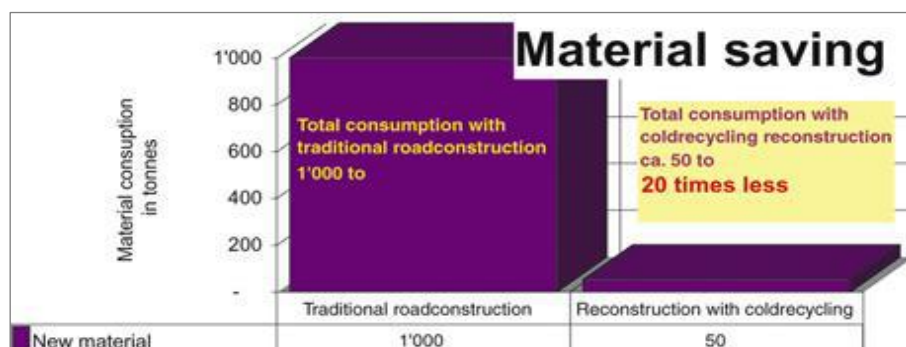


Figura 2.8: Consumo di materie prime per tecniche tradizionali e riciclaggio a freddo.

Nelle Figura 2.7 e Figura 2.8 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.

Sebbene tale metodologia presenti notevoli vantaggi, non esclude anche alcune limitazioni di seguito illustrate:

- *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;
- *elevato volume dei vuoti del prodotto confezionato* (che può raggiungere anche valori del 15%): ciò implica che un basso valore della densità può provocare scarsa capacità portante e limitate performance meccaniche;
- *difficoltà di rigenerare il legante organico presente nel RA*: nel riciclaggio a caldo si riesce ad ottenere una rigenerazione del vecchio bitume, se mescolato con quello vergine, addizionato di un agente chimico funzionale. 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. Questa limitazione comporta l'impiego di un eccesso di legante vergine;
- *difficoltà nella lavorazione dell'impasto*: questo difetto è comune ai trattamenti in sito, sia a freddo, sia a caldo. Per motivi pratici i mezzi impiegati non possono avere dimensioni eccessive e quindi essere dotati di camere di miscelazione sufficientemente ampie da garantire una buona miscelazione del conglomerato.

2.3.2 FASI DI LAVORAZIONE

La successione delle principali fasi di lavoro del riciclaggio a freddo inizia dalla fresatura, alla quale segue la rigenerazione a freddo del conglomerato fresato, che probabilmente è il procedimento più importante; le ultime due attività sono la stesa e la rullatura del conglomerato.

2.3.2.1 Fresatura

Questa lavorazione avviene tramite opportune macchine operatrici, fresatrici o riciclatrici, costituite da un tamburo cilindrico rotante e dotato di apposite sedi in cui alloggiavano particolari punte di acciaio speciale (Figura 2.9). 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. A causa di tale frantumazione del materiale, durante la fresatura viene prodotta molta polvere e per questo motivo 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 2.9: Tamburo rotante di una riciclatrice gommata.

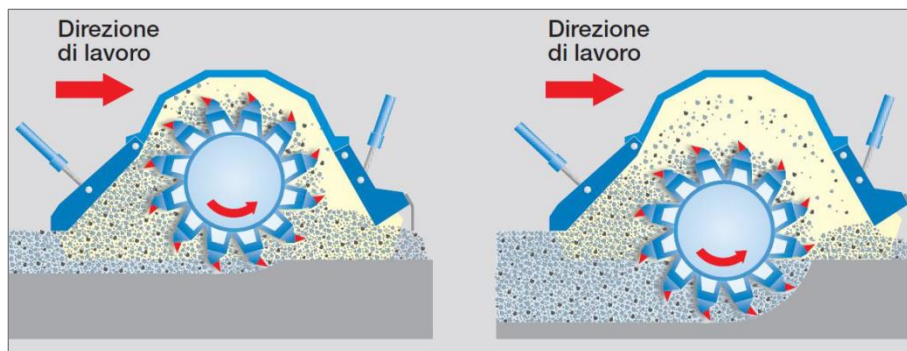


Figura 2.10: Vano di miscelazione variabile.

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 sua parte con piccoli interventi a “tassello”. Inoltre è possibile asportare uno spessore calcolato, 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 riguardo alle varie manutenzioni che si prevedono in futuro. In base al tipo d’intervento, è possibile regolare il volume della camera di fresatura in funzione del volume di materiale che è necessario trattare (Figura 2.10). Il vano di miscelazione variabile garantisce il volume di miscelazione ottimale a ogni profondità operativa. La superficie irregolare risultante dall’operazione di fresatura è particolarmente adatta come superficie di ancoraggio e garantisce assenza di scorrimento tra il vecchio materiale sottostante ed il nuovo che lo va a ricoprire.

2.3.2.2 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. Il materiale fresato, prima del mescolamento, viene pesato direttamente sulla macchina tramite una bilancia automatica (le pesate si fanno in t/ora) ed è quindi sottoposto ad un'azione preventiva di vagliatura tramite un vaglio vibrante, per l'ulteriore frantumazione delle parti di materiale eccedenti la massima pezzatura prevista. In seguito il materiale perviene per gravità ad un mescolatore-trasportatore ubicato nella parte inferiore della macchina dove, tramite degli iniettori, avviene l'aggiunta di acqua, additivo e legante.

L'acqua, misurata con precisione tramite un impianto d'iniezione gestito da un microprocessore, viene accuratamente miscelata con il materiale fresato in modo da raggiungere 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 schiumato, singolarmente o abbinati, possono essere iniettati nella camera di miscelatura mediante una barra spruzzatrice separata. Gli stabilizzanti in polvere, come il cemento, vengono normalmente cosparsi sulla superficie stradale preesistente nella parte antistante la riciclatrice. Quest'ultima passa sopra la polvere e la miscela, insieme all'acqua, con il materiale tramite un'unica passata. Al termine della miscelazione, il materiale viene fatto pervenire sul piano della pavimentazione per gravità ed è pronto per essere steso o dalla stessa macchina rigeneratrice o da una macchina finitrice.

2.3.2.3 Stesa

La stesa dei conglomerati bituminosi rigenerati a freddo è effettuata con la stessa macchina rigeneratrice (Figura 2.11) 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.



Figura 2.11: Banco di stesa accoppiato ad una riciclatrice cingolata.

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 così viene steso direttamente secondo lo spessore voluto, con una pre-compattazione assai utile per ridurre gli addensamenti differenziali 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 e di operare su una larghezza di 4.2 m.

2.3.2.4 Rullatura

Nella realizzazione di un conglomerato riciclato a freddo la rullatura è un'operazione particolarmente importante; durante questa fase, infatti, avviene l'eliminazione della maggior parte dell'acqua interstiziale e si completa la rottura definitiva ed irreversibile dell'emulsione bituminosa, o l'eliminazione dei vuoti con il bitume schiumato. 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. Nella selezione del rullo si tiene in considerazione che, a favore dell'efficacia dei rulli gommati, oltre la massa, gioca anche la maggiore area d'impronta: la regolazione della pressione degli pneumatici su valori più bassi favorisce l'aumento dell'area d'impronta, permettendo perciò un costipamento a livelli più profondi.

Raggiunto il valore di compattazione previsto dal progetto, si procede alla rullatura finale di rifinitura che è effettuata alternativamente con l'ausilio di un costipatore a rulli lisci per ottenere una buona rugosità superficiale. Le prestazioni dei rulli lisci possono essere notevolmente migliorate con l'adozione di un sistema vibrante in cui l'ampiezza e la frequenza siano variabili. 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 2.12).



Figura 2.12: Compattazione con rulli lisci metallici.

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 trenta passaggi, mentre per quelli misti o solo metallici (vibranti) venti passaggi. È inoltre assolutamente necessario controllare che tutta la larghezza del riciclato sia compattata con la medesima energia e che i bordi non risultino deformati sotto il peso dei mezzi.

2.3.3 TRENII DI RICICLAGGIO

La qualità delle attrezzature e delle tecniche utilizzate, da sole, non forniscono la garanzia che il lavoro sia eseguito a regola d'arte; infatti, oltre ad un corretto studio delle miscele e materie prime da adottare nell'approccio al riciclaggio a freddo in sito, la predisposizione delle macchine a costituire veri e propri "treni" rappresenta un fattore fondamentale per la riuscita delle lavorazioni. Si possono individuare due tipologie di treni, denominati 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.

2.3.3.1 Single unit

Il tipo di treno a *single unit* presenta la seguente composizione:

- macchina mescolatrice e riciclatrice (uno o due componenti) nella posizione centrale;
- cisterna per l'emulsione bituminosa, automezzo spanditore e cisterna per l'acqua nella parte anteriore;
- macchina livellatrice, rullo vibrante e rullo gommato nella parte posteriore.

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

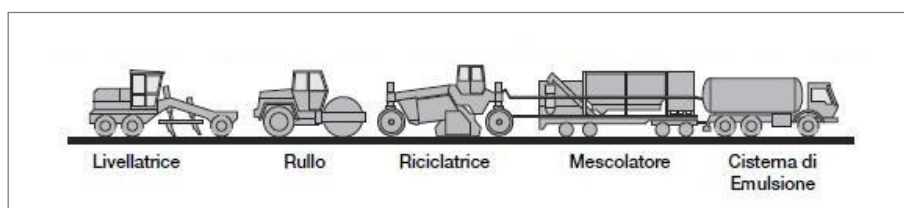


Figura 2.13: Treno di riciclaggio con cemento ed emulsione mediante riciclatrice gommata.

Il treno di riciclaggio rappresentato in Figura 2.13 viene normalmente usato quando si esegue il riciclaggio a freddo con emulsione di bitume e cemento. La riciclatrice spinge in avanti una cisterna di emulsione e un mescolatore di "slurry". In quest'ultimo il cemento e l'acqua vengono miscelati insieme in precise quantità

prestabilite e lo “slurry” viene poi trasferito e iniettato nella camera di miscelatura della riciclatrice. In alternativa, anziché impiegare un mescolatore di “slurry”, il cemento può essere cosparso come polvere davanti alla riciclatrice; in tal caso la cisterna di emulsione bituminosa viene collegata direttamente alla riciclatrice. Quanto detto vale per le riciclatrici gommate. Quando si esegue il riciclaggio superficiale in quei casi in cui la pavimentazione preesistente è composta da spessi strati di conglomerato bituminoso e il riciclaggio viene compiuto nell’ambito dello spessore del conglomerato stesso, solitamente si impiegano riciclatrici cingolate e il treno di riciclaggio viene configurato come illustrato in Figura 2.14.

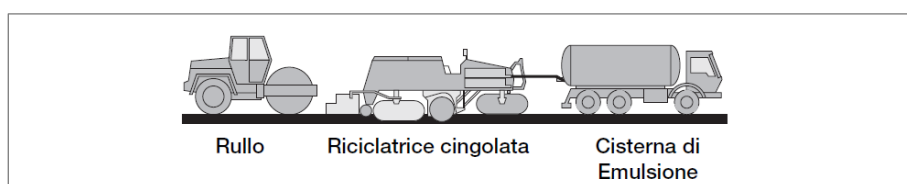


Figura 2.14: Treno di riciclaggio con emulsione bituminosa mediante riciclatrice cingolata.

In quei casi in cui si utilizza soltanto il bitume espanso, come accade per il riciclaggio di una pavimentazione composta da conglomerato e/o pietrisco di buona qualità, la riciclatrice spinge in avanti due cisterne: dapprima una contenente bitume a caldo, quindi una d’acqua (Figura 2.15 superiore). Qualora, invece, il bitume espanso 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 del legante alla testa del treno (Figura 2.15 inferiore). In alternativa, anche in questo caso, il cemento può essere cosparso in forma 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.

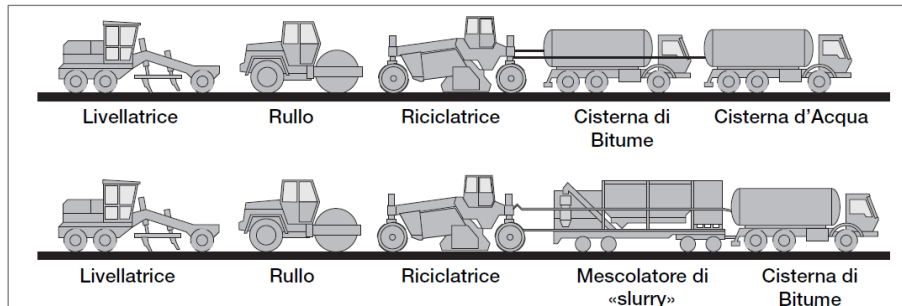


Figura 2.15: Treni di riciclaggio con bitume espanso, utilizzato da solo o con cemento.

Una volta riciclato, il materiale è soggetto ad una prima passata di un rullo compressore che lo consolida. Successivamente, viene profilato da una moto livellatrice prima di essere costipato da un rullo vibrante. 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 nel caso di interventi in aree urbane. Di contro, le principali limitazioni della tecnica consistono nella profondità raggiungibile e nel controllo della granulometria risultante dalla fresatura.

Le macchine mescolatrici e riciclatrici (Figura 2.16) 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), sia per acqua e cemento (alcune soluzioni prevedono che il cemento possa essere distribuito a secco sul manto stradale).



Figura 2.16: Particolare del treno: la riciclatrice spinge le cisterne ausiliarie.

In questa camera (Figura 2.17) il materiale fresato è spinto verso l'alto, dove incontra i vari tipi di legante opportunamente dosati, poi ricade sul tamburo o rotore di fresatura che, per effetto del suo movimento rotatorio, ne impasta e mescola gli elementi, riposizionandoli sulla pavimentazione appena fresata.

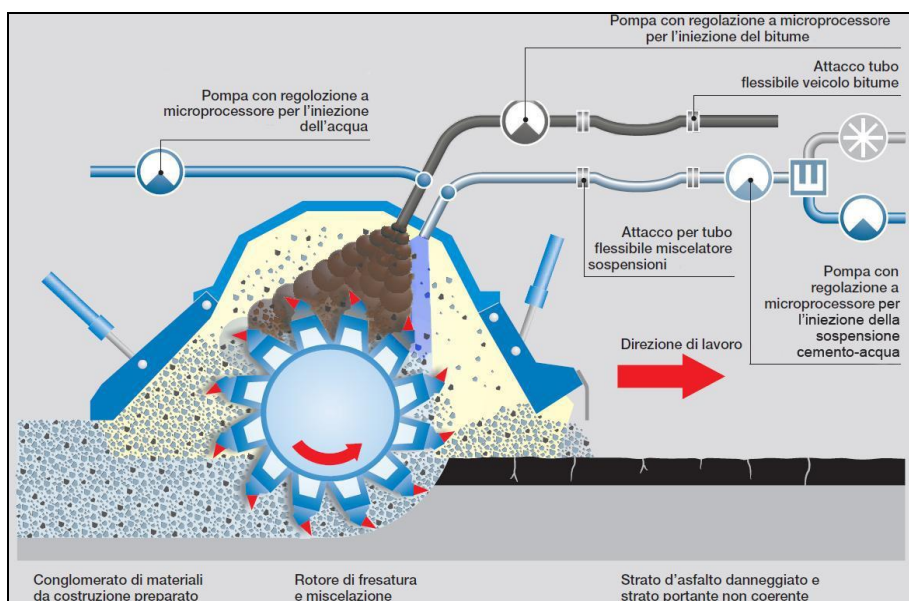


Figura 2.17: Schema riciclaggio a freddo con emulsione e distribuzione di cemento.

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.

Esiste una sostanziale differenza tra i rotori fresanti delle riciclatrici gommata e di quelle cingolate (Figura 2.18). La configurazione delle punte fresanti di un rotore di una riciclatrice gommata promuove un'azione di mescolamento nel piano verticale ma non in quello orizzontale (il massimo scostamento dalla posizione originaria è valutato pari a 200 mm), riflettendo le differenze iniziali dopo la ricaduta sul manto del materiale fresato. Il rotore di questo tipo di macchine deve prima penetrare nel sostrato del materiale legato 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 2.18: Rotore di una riciclatrice gommata (sinistra) e cingolata (destra).

Le punte fresanti delle riciclatrici cingolate sono disposte invece secondo una configurazione ad elica che convoglia il materiale verso il centro del rotore. Contrariamente al caso precedente, l'azione promossa da questa configurazione

favorisce il rimescolamento del materiale proveniente da ognuna delle 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 steso sulla larghezza d'intervento tramite un banco di stesa accoppiato alla macchina (Figura 2.19 e Figura 2.20).



Figura 2.19: Riciclatrice cingolata con banco di stesa adattato.

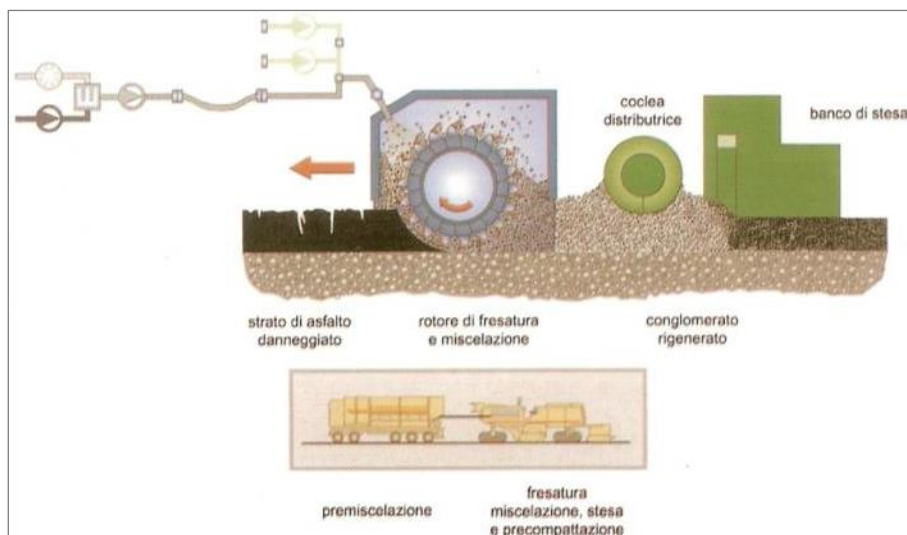


Figura 2.20: Particolare del treno e schema con banco di stesa.

Queste riciclatrici sono progettate e costruite per assicurare stabilità durante il trattamento di spessi strati di conglomerato bituminoso, senza quindi la necessità di

penetrare lo strato sottostante a quello 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 250 mm, o meno ove sia previsto l'uso congiunto di stabilizzanti. Sono pertanto macchine ideali per riciclare materiali costituiti interamente di fresato (100% RA).

2.3.3.2 Multi unit

Il tipo di treno a *multi unit* (Figura 2.21) è composto dalle seguenti macchine:

- macchina mescolatrice/riciclatrice in posizione centrale;
- fresa, cisterna per l'emulsione bituminosa, automezzo spanditore (se necessario), cisterna per l'acqua (se necessaria) nella posizione anteriore;
- finitrice, rullo vibrante e rullo gommato nella posizione posteriore.

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 lo deposita nella vibrofinitrice che lo stende.

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, operazione alla quale farà seguito la rullatura definitiva. In entrambi i casi la prima passata deve essere eseguita 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 mediante la costipazione definitiva effettuata con la combinazione sia di rullo statico, sia gommato.



Figura 2.21: Foto di un treno di riciclaggio CMT 250 della Marini.



Figura 2.22: Schema con dosatrice e mescolatrice a doppio albero.

Nonostante i progressi inerenti ai macchinari e alle tecnologie di riciclaggio a

freddo in sito registrati negli ultimi anni, 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 particolarmente accurato tutti i compiti. Nel caso di lavori di una certa importanza si preferisce impiegare treni del secondo tipo perché garantiscono migliore qualità del prodotto finito.

CAPITOLO 3:

STABILIZZAZIONE CON EMULSIONE E CEMENTO

Le miscele riciclate a freddo mediante stabilizzazione con emulsione di bitume e legante cementizio sono costituite dai seguenti elementi (Figura 3.1):



Figura 3.1: Principali elementi delle miscele con emulsione bituminosa e cemento.

- emulsione bituminosa;
- cemento;

- aggregati (fresato e materiali vergini) e filler;
- acqua;
- additivi.

3.1 EMULSIONE BITUMINOSA

L'emulsione bituminosa è costituita da gocce di bitume disperse in una fase continua acquosa ed è stata originariamente sviluppata per superare le difficoltà di tutte le lavorazioni che richiedono bitume caldo; nell'emulsione il bitume è reso fluido proprio mediante la sua dispersione in acqua, anziché tramite dissoluzione in solventi, come nel caso di bitumi liquidi, o mediante processi di riscaldamento. Per ottenere tale dispersione è quindi necessario utilizzare energia meccanica di taglio e un agente tensioattivo o emulsionante (Figura 4.2).

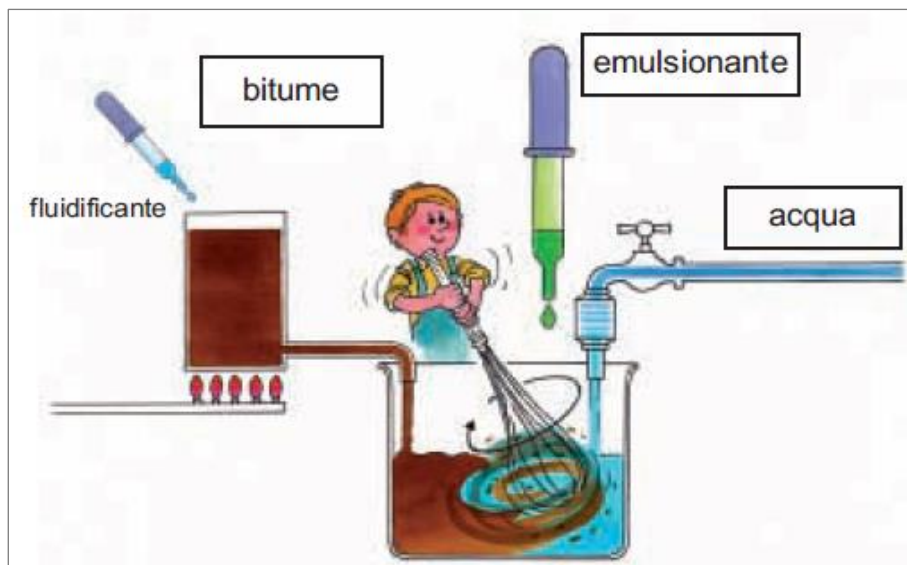


Figura 3.2: Schema rappresentante la produzione di emulsione bituminosa.

Scientificamente un'emulsione è un sistema eterogeneo termodinamicamente instabile che include almeno due fasi, delle quali una (in questo caso il bitume) è dispersa nell'altra (l'acqua) sotto forma di goccioline. Un tale sistema possiede una sua stabilità minima che può essere incrementata mediante l'aggiunta di appropriati agenti tensioattivi i quali abbassano la tensione superficiale o interfacciale tra le due fasi, favorendone la dispersione; un'emulsione di bitume deve quindi contenere anche degli agenti adeguati che favoriscano il mantenimento dell'equilibrio.

La maggior parte delle emulsioni usate come leganti ha una componente di bitume residuo del 60%; ciò significa che il 60% della massa dell'emulsione è composto da bitume disperso nel restante 40% composto da acqua. Nella fase acquosa è presente l'emulsionante, i cui dosaggi variano da 0.15% a 2.5% sulla massa dell'emulsione.

Il maggior vantaggio offerto dall'emulsione di bitume è la sua possibilità di utilizzo a temperatura ambiente (anche se è poco opportuno impiegarla a temperature inferiori a 5°C) e riveste particolare importanza nel processo di stabilizzazione, in quanto è utilizzabile in ambiente umido e con inerti freddi.

3.1.1 COMPONENTI

3.1.1.1 Bitume

Il bitume utilizzato in ambito stradale è ottenuto industrialmente mediante la distillazione frazionata del petrolio. Il greggio proveniente dal Medi Oriente è quello maggiormente sfruttato, anche se attualmente sono considerati superiori dal punto di vista qualitativo i bitumi derivati dal greggio venezuelano lavorato 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; esso è costituito da tre famiglie di elementi che non corrispondono a entità chimiche ben definite, ma sono il risultato di differenti processi di separazione:

- *carboidi e carbeni* (insolubili nel tetracloruro di carbonio);
- *asfalteni* (insolubili nel normale-eptano; composti molto complessi a struttura condensata);
- *resine e oli* (solubili nei solventi sopracitati).

Gli ultimi due elementi possono essere raggruppati sotto il nome di *malteni*. Poiché i carboidi e i carbeni sono presenti in quantità molto ridotta, il bitume può essere rappresentato 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 la caratteristica aromatica ed eterociclica.

Il bitume assolve la funzione di legante che unisce insieme grani minerali di diversa forma e grandezza. Affinché tale legame sia mantenuto è necessario 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 proprietà che contraddistingue tal legante è la sua dipendenza termica; esso può, infatti, essere solido o semisolido a temperatura ambiente e può essere liquefatto mediante semplice riscaldamento. La suscettibilità termica costituisce allo stesso tempo un vantaggio ed uno svantaggio, non consentendo al bitume stesso di conservare costanti le proprietà di coesione al variare della temperatura d'esercizio.

In campo stradale, da ormai circa vent'anni, si assiste alla progressiva affermazione di nuovi tipi di bitume capaci di prestazioni elevate, denominati *bitumi modificati*, che vanno ad affiancare quelli non modificati, denominati quindi *bitumi tradizionali*. 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.

La normativa di riferimento per i bitumi tradizionali ad uso stradale è la EN 12591, riassunta in Tabella 3.1.

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:													
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 3.1: Specifiche EN 12591 per bitumi stradali.

Come si può facilmente osservare dalla tabella, sono previsti diversi tipi di bitume che sono contraddistinti dall'intervallo di valori con il test di penetrazione a 25°C. Il mercato italiano preferisce le gradazioni 50/70 e 70/100 per le

pavimentazioni stradali.

Con l'introduzione delle norme europee EN si sono fatti notevoli progressi rispetto alle specifiche prescritte dalle norme CNR, soprattutto in virtù della maggiore attenzione al fenomeno d'invecchiamento del bitume, 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 suo comportamento (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:

- penetrazione a 25°C;
- punto di rammollimento (prova palla-anello);
- viscosità a diverse temperature.

Tuttavia bisogna ricordare che il parametro "viscosità" non è prescritto né dalla vecchia normativa CNR, né dall'attuale normativa EN; penetrazione e punto di rammollimento sono, invece, sempre indicati e rappresentano valori basilari che devono essere noti e determinati.

A differenza dei bitumi tradizionali, le specifiche europee per i bitumi modificati sono ancora in discussione e non ancora ufficializzate dal CEN. Per ovviare a tale carenza, il SITEB (Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade) ha prodotto una tabella di specifiche tecniche (contenente anche il parametro "viscosità" a 160°C) che identifica quattro diverse classi di bitume modificato adatte alle diverse tipologie di strade e di traffico, con indicati i valori minimi affinché le prestazioni richieste siano garantite e i metodi di analisi.

La Tabella 3.2 riporta le specifiche tecniche suggerite dall'Associazione SITEB per l'individuazione e la scelta dei bitumi modificati, valide per condizioni climatiche normali dell'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					
Applicazioni tipiche suggerite	-conglomerati alto modulo per strato di base e di collegamento	-conglomerati alto modulo per strato di base e di collegamento	-tappeti d'usura drenanti e fonoassorbenti -tappeti antisdrucciolo (split mastix asphalt, grenu e semigrenu) -manti ultrasottili -conglomerati chiusi ad alte prestazioni	-conglomerati tradizionali migliorati -tappeti antisdrucciolo (split mastix asphalt, grenu e semigrenu) -conglomerati aperti	Metodo d'analisi	
Tipologia di strade e condizioni di traffico	-strade extraurbane principali e secondarie -piazze portcontainers -piste aeroportuali	-strade urbane, extraurbane principali e secondarie	-strade extraurbane di scorrimento	-strade urbane, extraurbane principali e secondarie		
	Traffico molto pesante lento	Traffico medio e 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		ASTMD4402
Ritorno elastico a 25°C (%)	≥50	≥50	≥75	≥50		DIN52013
Stabilità allo stoccaggio D pen (dmm) e P&A (°C)	≤5	≤5	≤5	≤5		EN13399
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/cm²)	≥5	≥5	≥5	≥5	Pr EN 4023	

(*) 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 3.2: Specifiche tecniche per la scelta dei bitumi modificati.

3.1.1.2 Acqua, emulsionanti e fluidificanti

Oltre al bitume, che conferisce le principali caratteristiche fisiche e meccaniche all'emulsione, gli altri elementi di rilevante importanza sono: emulsionanti, acqua e fluidificanti. Gli emulsionanti sono prodotti chimici classificabili in base al loro comportamento di dissociazione in acqua che, dapprima favoriscono la dispersione di bitume, quindi, successivamente alla rottura dell'emulsione, 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 conferisce loro proprietà idrofile, quindi affinità chimica con l'acqua;
- una catena idrocarburica apolare $\text{R} = \text{CH}_3(\text{CH}_2)_n$ che conferisce loro proprietà liofile (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.

Gli emulsionanti si distinguono in *anionici*, *cationici* e *non ionici*, in funzione della carica che i loro gruppi polari tendono ad assumere; il segno di questa 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 possono essere misurati ed espressi attraverso il *potenziale zeta* (misura della densità di carica superficiale). Gli emulsionanti solitamente impiegati nel campo stradale sono: *anionici* (saponi di acidi grassi) e *cationici* (ammine o sali di ammonio), rappresentati nell'Figura 3.3.

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

Poiché gli emulsionanti sono insolubili in acqua, è indispensabile trasformarli in

saponi per permetterne lo scioglimento nella fase disperdente. A tale scopo si fanno reagire con acido cloridrico (in concentrazione 32%) nel caso delle emulsioni acide, o con soda (NaOH) per quelle basiche.

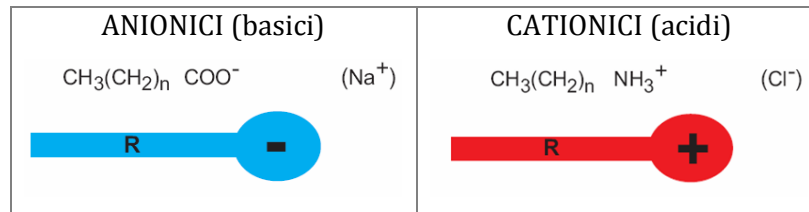


Figura 3.3: Tipi di emulsionanti.

La scelta dell'emulsionante 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 emulsionante superiore a quello strettamente necessario per ottenere una buona stabilità e per rivestire completamente l'interfaccia bitume-acqua (Figura 3.4).

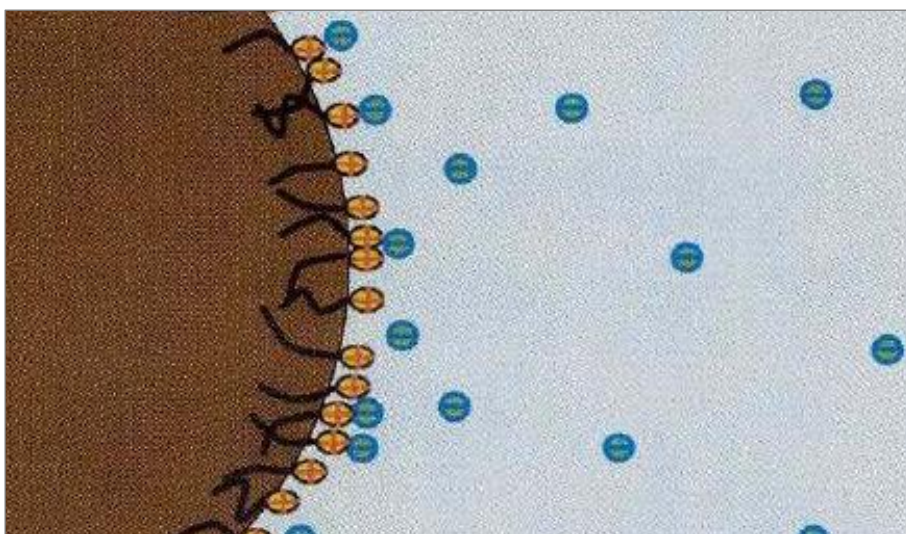


Figura 3.4: Interfaccia bitume-acqua con particelle di emulsionante.

In questo modo l'emulsione può contenere dell'emulsionante libero o sotto forma di micelle in soluzione nella fase acquosa. Esso agisce da riserva di emulsivo prevenendo la coalescenza durante la produzione, lo stoccaggio e il trasporto dell'emulsione di bitume.

L'assorbimento 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 soprafatta e le particelle flocculassero, l'emulsionante ne inibirebbe la coalescenza (Figura 3.5).



Figura 3.5: Condizione in cui può presentarsi un'emulsione bituminosa.

L'acqua scelta non deve contenere né impurità organiche, né minerali; per la produzione delle emulsioni si utilizza in genere acqua di pozzo o di acquedotto, anche se in alcuni casi diventa 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.

3.1.2 TIPI DI EMULSIONE

3.1.2.1 Emulsioni bituminose anioniche (basiche)

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 $R\text{-COO}^-\text{Na}^+$, 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 (gli ioni $R\text{-COO}^-$) costituiscono gli anioni assorbiti dai globuli di bitume (Figura 3.6).

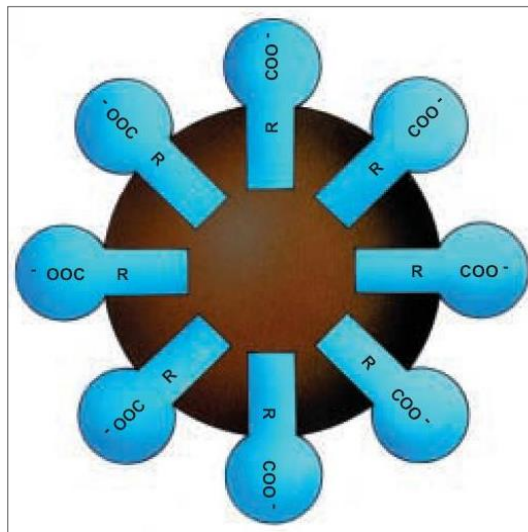


Figura 3.6: Schema emulsione anionica.

In campo stradale l'impiego delle emulsioni anioniche è limitato alle mani

d'attacco in alcune aree geografiche del centro e del sud Italia, caratterizzate da situazioni ambientali favorevoli e dalla disponibilità di aggregati di adeguata affinità chimica (calcarei). Generalmente esse sono abbastanza semplici da produrre, relativamente meno costose e anche assai meno performanti.

La Tabella 3.3 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 3.3: Classificazione e proprietà delle emulsioni anioniche.

3.1.2.2 Emulsioni bituminose cationiche (acide)

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 tra bitume e acqua e gli anioni Cl^- restano nell'acqua (Figura 3.7).

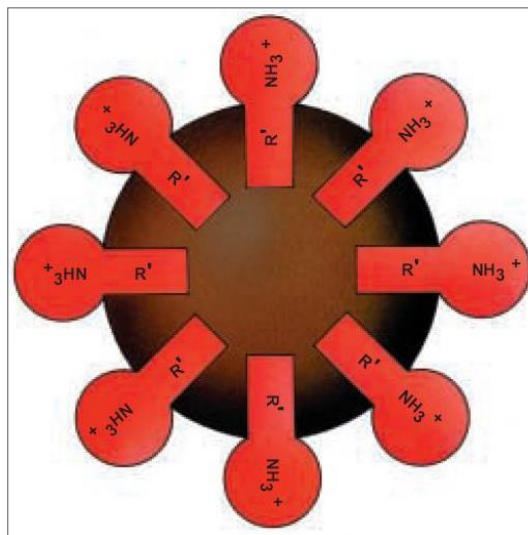


Figura 3.7: Schema emulsione cationica.

A causa 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 cariche 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 3.4.

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
Composizione							
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
Caratteristiche							
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.
Caratteristiche del bitume estratto							
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 3.4: Classificazione e proprietà delle emulsioni cationiche.

Un confronto tra i due tipi di emulsioni bituminose già descritte è invece contenuto nelle seguenti tabelle. Il confronto verte rispettivamente sulle caratteristiche generali delle due emulsioni bituminose, Tabella 3.5, e sull'affinità di

queste con l'aggregato, Tabella 3.6, in relazione alla loro natura, alla velocità con cui l'acqua si separa dal bitume ed alla proprietà di adesione.

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 3.5: 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 3.6: Affinità delle emulsioni anioniche e cationiche con aggregati di diversa natura.

3.1.2.3 Emulsioni modificate

Le emulsioni bituminose modificate si dividono in due categorie: *monofase* e *bifase*. Le prime sono caratterizzate da una fase dispersa composta da globuli di bitume modificato da plastomeri tipo EVA (EtilVinilAcetati), o elastomeri tipo SBS (StireneButadieneStirene); le seconde sono caratterizzate da una fase dispersa composta sia da globuli di bitume, sia da goccioline di agente modificante, che si presenta come una dispersione in acqua di polimeri naturali o sintetici di piccolissime dimensioni (in genere di diametro inferiore ad 1 μm), come la gomma di lattice.

Entrambe le tipologie migliorano la coesione alle temperature medio-alte; le prestazioni alle basse temperature incrementano l'intervallo di elasto-plasticità, il

comportamento all'invecchiamento e reologico in generale. I dosaggi degli agenti modificanti oscillano generalmente tra 2.5% e 6% sulla massa del bitume.

3.1.3 PRODUZIONE, STOCCAGGIO E TRASPORTO

3.1.3.1 Produzione

L'emulsione del bitume consiste nel frammentare detto materiale in particelle di dimensioni piccolissime (dell'ordine di pochi micron), caricarle elettricamente e dotarle di potere repulsivo le une contro le altre. La produzione industriale delle emulsioni richiede quindi 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 realizzata 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: energia di dispersione, viscosità e temperatura e, infine, dosaggio dei componenti.

Energia di dispersione: essa 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, la quale abbassa la tensione superficiale tra le due fasi.

Viscosità e temperatura: affinché il bitume si disperda adeguatamente 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 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 alle seguenti temperature (Tabella 3.7).

PENETRAZIONE (dmm)	TEMPERATURA D'EMULSIONE (°C)
160/220	140
70/100	150
35/50	160

Tabella 3.7: Grado di penetrazione del bitume in funzione della temperatura.

Nel caso di emulsioni da bitume modificato, occorre operare a temperature superiori. La soluzione acquosa contenente 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.

Dosaggio delle componenti: esso deve essere curato con grande precisione, in particolare quello degli emulsionanti e dell'acido, poiché una variazione anche minima dei quantitativi può avere notevoli conseguenze sulle caratteristiche dell'emulsione di bitume.

3.1.3.2 Stoccaggio

L'emulsione può essere stoccata per un periodo che può raggiungere diversi mesi e ciò può avvenire sia sul luogo stesso di produzione, sia in prossimità dei cantieri di utilizzo. In genere, dopo uno stoccaggio prolungato, sulla superficie

dell'emulsione a contatto con l'aria si forma una pellicola di bitume, detta in gergo *pelle*. Questa pellicola non presenta alcun inconveniente, anzi assicura una certa protezione dell'emulsione.

Altri fenomeni che possono verificarsi durante lo deposito sono la *sedimentazione*, che si traduce in un aumento di tenore di bitume nell'emulsione nella parte bassa del serbatoio, oppure il fenomeno inverso di *crematura*, che si manifesta con aumento del tenore del bitume nella parte alta. Questi fenomeni si manifestano e progrediscono in funzione dei tempi e delle temperature di stoccaggio e di una granulometria di particelle di bitume non adatta. Entrambi i fenomeni, comunque, non rappresentano un danno se non generano la coagulazione dell'emulsione ed è sufficiente procedere ad un rimescolamento dell'emulsione prima della consegna per ritrovare un tenore di bitume omogeneo. Le attrezzature di rimescolamento sono molteplici: dagli agitatori ad elica a basso gradiente di taglio, fino alle pompe di rimescolamento, il quale risulta più efficace con il travaso per pompaggio da un serbatoio all'altro.

L'emulsione è poi sensibile al gelo che produce una rottura irreversibile; la temperatura minima dipende dalla composizione dell'emulsione, ma generalmente non deve scendere al di sotto di un intervallo compreso tra +2°C e +5°C. Per lo stoccaggio può essere utile aggiungere dell'antigelo all'emulsione stessa e in ogni caso la cosa migliore da fare è quella di riscaldala leggermente prima dell'utilizzo.

3.1.3.3 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) e si tratta delle 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.



Figura 3.8: Autocisterna per il trasporto di emulsione bituminosa.

Per grosse capacità, è indispensabile dividere l'interno del serbatoio con delle paratie (Figura 3.8), che durante il trasporto assicurano una migliore stabilità del mezzo ed evitano un rimescolamento troppo violento il quale genererebbe la formazione di schiuma.

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

3.1.4 PROPRIETÀ E RUOLO DELL'EMULSIONE

Il fine dell'emulsione è quello di fungere da legante (organico). La tecnica di produzione, il tipo di emulsione e le sue caratteristiche possono influenzare in maniera determinante l'esito degli interventi di riciclaggio.

Le proprietà delle emulsioni bituminose si distinguono in due gruppi: il primo è rappresentato dalle *proprietà intrinseche*, ossia viscosità e stabilità allo stoccaggio, cioè quelle che non dipendono dalle sostanze minerali con le quali vengono utilizzate, mentre il secondo gruppo è rappresentato dalle *proprietà estrinseche*, velocità di rottura e adesione, cioè quelle legate al comportamento dell'emulsione 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 poiché 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. Un'emulsione troppo fluida, una volta spruzzata, potrebbe scorrere sulla pendenza del piano, riducendo la sua efficacia sia se utilizzata come mano d'attacco, ma soprattutto nel caso di trattamenti superficiali. Al contrario, un'eccessiva viscosità impedirebbe la penetrazione dell'emulsione in profondità, soprattutto nel caso di "impregnazione" su strada bianca.

La *stabilità* impedisce la separazione dell'emulsione nei suoi costituenti. Un fattore determinante della stabilità allo stoccaggio è la granulometria dell'emulsione

che dipende essa stessa da diversi parametri: tipo e quantità di emulsionanti (tensioattivi), pH della fase acquosa, origine e gradazione del bitume.

La *velocità di rottura* è il modo, rapido o lento, con cui avviene il fenomeno elettrofisico in base al quale il bitume si separa dall'acqua. La rottura delle emulsioni dello stesso è una proprietà fondamentale oggetto di numerose teorie scientifiche. La velocità di rottura può essere definita analiticamente anche come *indice di rottura* e rappresenta la capacità dell'emulsione di impastare una quantità ben definita di fini standard (polveri silicee).

Il procedimento si sviluppa attraverso le seguenti fasi (Figura 3.9):

- *decantazione* (sedimentazione dei globuli di bitume);
- *flocculazione* (avvicinamento dei globuli sedimentati);
- *coagulazione* (fusione dei globuli di bitume flocculati e formazione del coagulo).

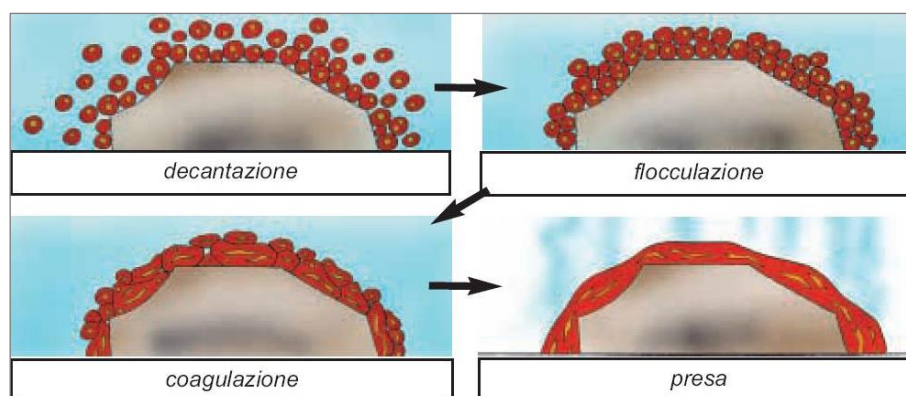


Figura 3.9: Schema del processo di rottura e presa.

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, il rivestimento legante è completo ed il legante che rimane è costituito da solo idrocarburi non volatili.

La rottura e la presa determinano quindi lo sviluppo delle proprietà meccaniche del bitume presente e quindi la maturazione dell'emulsione. 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; la presa può essere ritardata per l'umidità presente;
- la rottura avviene più velocemente alle alte temperature, anche se ciò non è sempre vantaggioso. Un clima caldo può provocare la formazione di una pelle sugli inerti superficiali, che intrappola l'acqua;
- la pressione esercitata dal lento movimento dei mezzi spinge l'acqua ad allontanarsi dalla miscela, favorendo la coesione, la presa e la stabilità;
- il filler accelera la rottura;
- le cariche degli agenti emulsionanti, in combinazione con le cariche superficiali degli inerti, condizionano i processi di rottura e presa;
- se la temperatura degli inerti e dell'emulsione è bassa si verifica un ritardo della rottura.

L'*adesione* è un'altra proprietà fondamentale delle emulsioni e dipende dalla carica elettrostatica conferita dagli emulsionanti ai globuli di bitume e si verifica in funzione della temperatura e dell'eventuale presenza di agenti perturbativi (ad esempio la 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 si ha 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 la formazione di un silicato di ammina insolubile. Con emulsione anionica non avviene alcun fenomeno di attrazione, né alcuna reazione, cioè non c'è adesione. Di fatto, la maggior parte degli aggregati utilizzati nei lavori stradali è costituita da materiali di natura mista (calcari e silicei) e sulle pietre silicee l'emulsione anionica non ha alcun effetto. Ciò spiega l'utilizzo, ormai ovunque diffuso, di emulsioni di bitume esclusivamente cationiche.

In conclusione, l'emulsione bituminosa e le sue caratteristiche incidono sulle proprietà delle miscele da realizzare, sia dal punto di vista volumetrico, sia in termini meccanici. La lavorabilità, l'addensabilità, i tempi di esecuzione e le prestazioni meccaniche sono fortemente influenzate dall'azione legante e dai tempi di maturazione dell'emulsione stessa. Una ricerca delle performance della pavimentazione non può quindi prescindere da un adeguato dosaggio e da un'attenta selezione dell'emulsione e dei suoi componenti.

3.2 CEMENTO

Con il progredire della ricerca nel campo del riciclaggio a freddo, al fianco del

legante organico si stanno affermando quelli 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 esercizio.

Nel riciclaggio a freddo si utilizza 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 oppure, 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 del 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 e S, rispettivamente al posto di ossido di calcio (CaO), ossido di alluminio (Al_2O_3), ossido di ferro (Fe_2O_3), ossido di silicio (SiO_2). In tal modo i composti mineralogici del clinker possono essere indicati con i simboli C_3S (silicato tricalcio, alite), β - C_2S (silicato bicalcico, belite), C_3A (alluminato tricalcico, celite) e C_4AF (alluminato ferrito tetracalcico, brownmillerite).

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 C_3S , in particolare, a causa di una più alta velocità d'idratazione, è

possibile raggiungere resistenze meccaniche più elevate in un minor tempo. Da ciò si potrebbe concludere che un cemento Portland ideale dovrebbe contenere solo C_3S , o una miscela di β - C_2S e C_3S . In realtà esistono almeno due ragioni, entrambe di carattere economico, che giustificano la presenza del C_3A e del C_4AF nel clinker del cemento Portland:

- difficoltà di reperire grandi quantitativi di calcare e sabbia privi di Al_2O_3 e Fe_2O_3 ;
- 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 offre condizioni più economiche.

3.2.1 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 a ottenere dal 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 resistenti alle azioni corrosive del clinker, oltre che alle alte 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 10-20 m e con diametro 2-3 m, sono alimentati in alto dal granulato, miscela di coke e materie prime.

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 3.8.

Silicato tricalcico	$3CaO SiO_2$	C_3S
Silicato bicalcico	$2CaO SiO_2$	C_2S
Alluminato tricalcico	$3CaO Al_2O_3$	C_3A
Alluminato ferrito tetracalcico	$3CaO Al_2O_3 Fe_2O_3$	C_4AF

Tabella 3.8: Composti principali del clinker.

Il silicato tricalcico è il composto presente in quantità maggiore (60-70%) nel cemento e 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 procedimento deve avvenire piuttosto rapidamente per impedire che i due silicati di

calcio si trasformino in altre fasi non idrauliche, che non sono in grado di indurire per reazione con l'acqua. Dal diagramma di stato del sistema $\text{CaO} - \text{SiO}_2$ si deduce che sotto ai 1250°C il silicato tricalcico C_3S non è stabile e si decompone secondo la reazione:



Tale reazione 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 C_3S 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.

3.2.2 IDRATAZIONE, 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 essa diviene più consistente e comincia a perdere la sua deformabilità; questo aumento di consistenza prende il nome di *presa*. Successivamente, di solito dopo un giorno, la pasta diventa così rigida da assumere l'aspetto e la durezza di una pietra; questo processo prende il nome di *indurimento*. Entrambi i procedimenti 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 inizio 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 3.10).

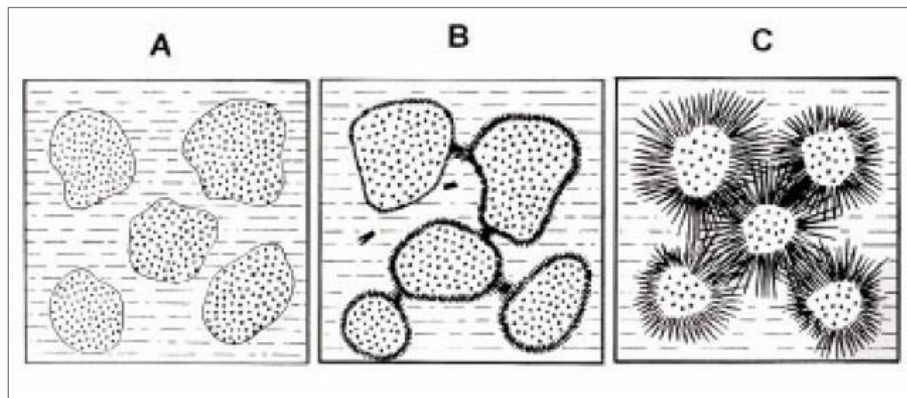


Figura 3.10: Processo d'idratazione del cemento.

Subito dopo l'impasto, durante il primo stadio, la pasta di cemento è costituita da un insieme di granuli di clinker e di gesso, di forma tendenzialmente 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 d'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 con il procedere dell'idratazione una parte dello spazio, originariamente occupato dall'acqua, è riempita dai prodotti della reazione tra acqua e cemento. Tale processo 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 d'idratazione del cemento durante le prime ore. Inoltre i prodotti

idratati sono molto 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, sia 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 (trisolfo-alluminato di calcio idrato, che si può formare per reazione tra l'alluminato tricalcico e i solfati di calcio.), entrambi capaci di creare 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, provocano il fenomeno della presa già dopo qualche ora dall'impasto del cemento con l'acqua.

In seguito, 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 d'idratazione del cemento, dipenderà dalla distanza originaria dei granuli dello stesso e cioè dal rapporto acqua/cemento nell'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 dipende 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 livello, proviene probabilmente dall'idratazione della calce libera del clinker o da quella topochimica del C_3S e 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 3.11). La morfologia dei cristalli di ettringite è influenzata dalla concentrazione degli ioni Ca^{2+} e SO_4^{2-} della soluzione dalla quale i cristalli stessi si formano. In soluzioni molto concentrate di idrossido di calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ detti cristalli si presentano sotto forma di piccoli prismi, mentre in soluzioni povere di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ essi si presentano allungati e ben sviluppati. Nel primo caso questa forma di ettringite è detta

colloidale ed è in grado di assorbire notevole quantità di acqua, grazie all'enorme sviluppo superficiale oltre che alla 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 dopo un giorno dall'impasto, in monosolfato alluminato idrato. Eccezionalmente questo composto può formarsi anche nelle prime ore, perché si possono verificare localmente concentrazioni molto basse di SO_4^{2-} .

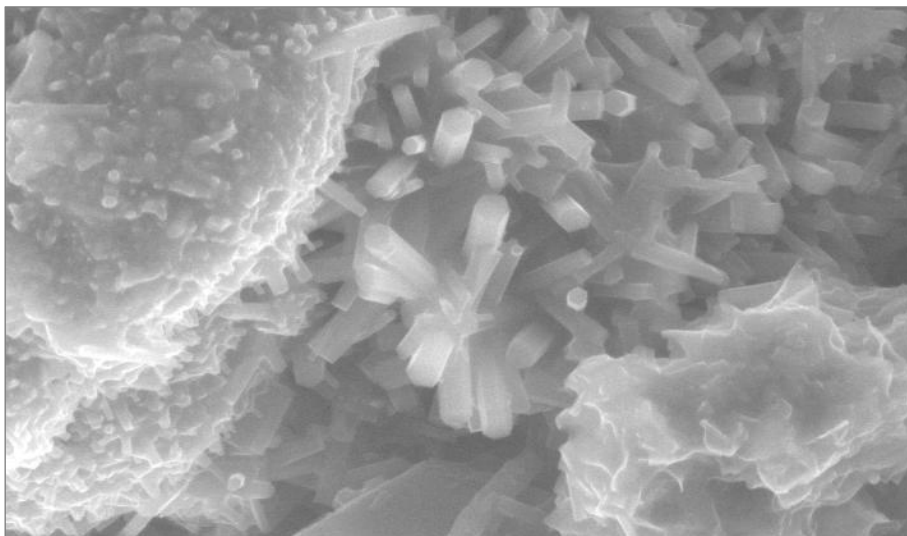


Figura 3.11: Cristalli di ettringite al microscopio elettronico.

In pratica lo sviluppo del silicato di calcio idrato, indicato con la sigla C-S-H (acronimo inglese di Calcium Silicate Hydrated) ha inizio con la prima formazione dell'idrossido di calcio $Ca(OH)_2$; tuttavia la sua identificazione risulta estremamente difficile a causa della sua natura scarsamente cristallina. Il C-S-H può presentarsi in forme particellari diverse, è di natura prevalentemente fibrosa e ad esso si devono

l'indurimento e le proprietà meccaniche delle paste cementizie (Figura 3.12). Con l'evolversi della reazione le fibre dapprima si toccano, poi si intrecciano tra di loro.

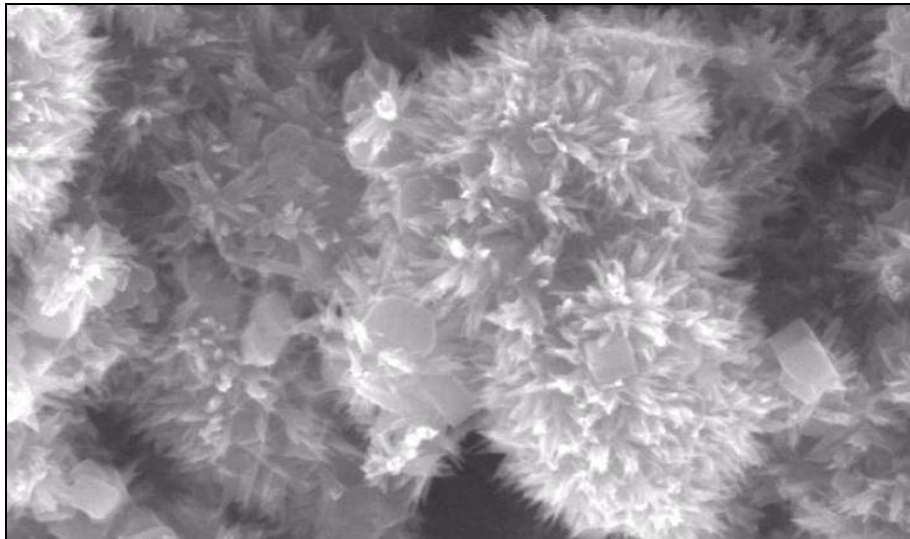


Figura 3.12: Silicato di calcio idrato C-S-H al microscopio elettronico.

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.

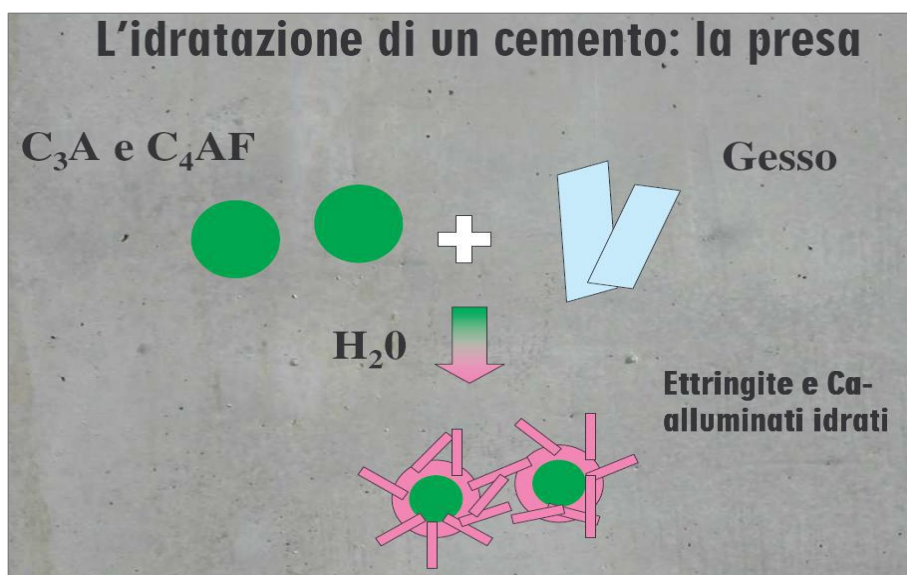


Figura 3.13: Schematizzazione delle reazioni durante la presa del cemento.

- **INDURIMENTO:** C_3S e $C_2S + H_2O \rightarrow C-S-H$ e Idrossido di calcio.

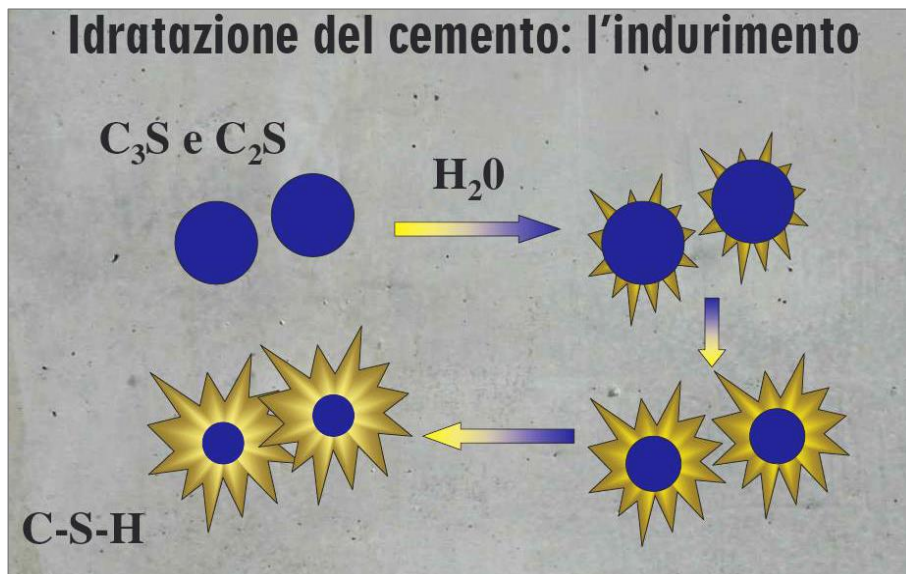


Figura 3.14: Schematizzazione delle reazioni durante l'indurimento del cemento.

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 il prodotto finale (Figura 3.15).

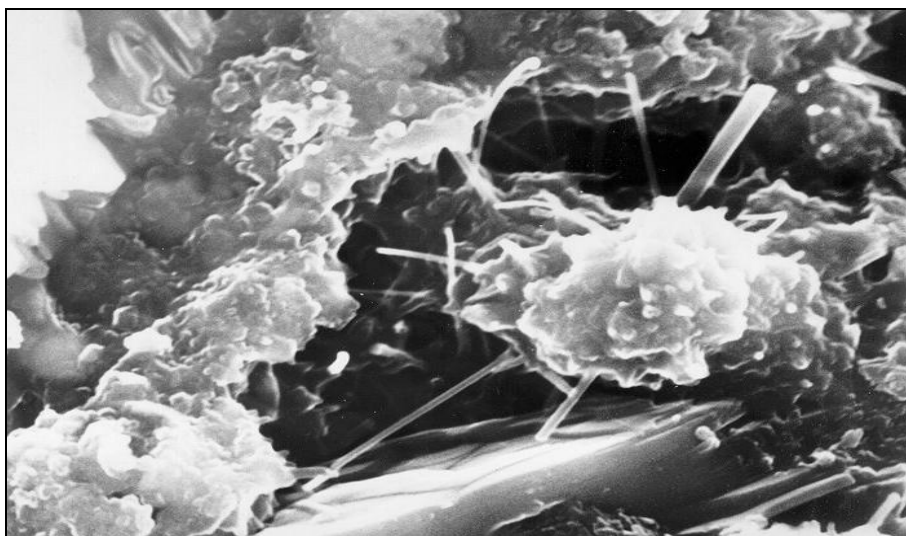


Figura 3.15: C-S-H, ettringite e idrossido di calcio al microscopio elettronico.

3.2.2.1 Influenza della temperatura sull'idratazione del cemento

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

In generale, un aumento della temperatura provoca una presa più rapida, dovuta essenzialmente alla maggior velocità d'idratazione del C₃A che sottrae acqua all'impasto fresco, anche se ciò comporta una maggiore difficoltà nel 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 3.16 è mostrato schematicamente l'effetto della temperatura sul tempo iniziale e finale di presa.

Si può osservare che un aumento della temperatura provoca un'evidente riduzione del tempo di presa, in particolare di quello finale. 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. Ciò produce un aumento della resistenza meccanica a brevi stagionature, ma una diminuzione della resistenza meccanica a quelle lunghe. Le basse temperature provocano una maturazione più lenta e basse resistenze meccaniche nel breve termine, 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 e prodotti attraverso un processo d'idratazione più lento.

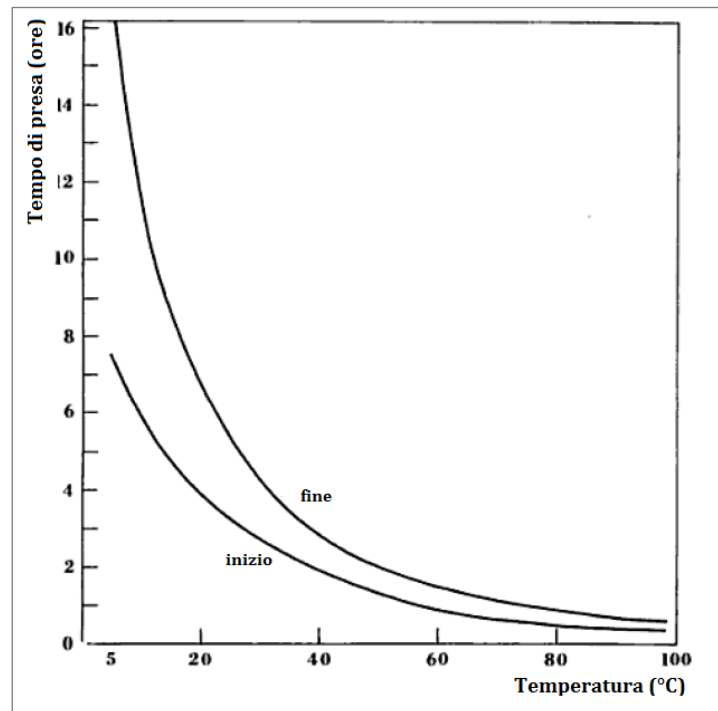


Figura 3.16: Influenza della temperatura sui tempi iniziali e finali di presa.

Le alte temperature quindi provocano una più rapida perdita di lavorabilità del conglomerato cementizio, alla quale si è soliti ovviare facendo ricorso ad alcuni accorgimenti: aumento dell'acqua d'impasto, utilizzo di additivi che ritardino la presa, protezione per impedire un'eccessiva evaporazione dell'acqua, scelta di un cemento la cui presa sia meno influenzata dalla temperatura e infine preraffreddamento degli 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 d'idratazione. Esso è di grande ausilio quando si

opera in climi freddi, ma può diventare un grosso inconveniente in climi caldi, poiché può generare fessurazioni da ritiro che devono essere opportunamente evitate.

3.2.3 PROPRIETÀ E RUOLO DEL CEMENTO

A seconda del ruolo che la miscela ha nel pacchetto stradale, in abbinamento all'emulsione bituminosa può essere usato il cemento Portland, in particolare quello con classe di resistenza 325. Come già illustrato, il cemento è un legante idraulico che, a contatto con l'acqua dell'emulsione e di aggiunta, sviluppa le sue caratteristiche, ma può essere usato anche come filler per completare la curva granulometrica. Le percentuali d'impiego variano a seconda dello strato da realizzare: la tendenza è quella di impiegarlo nell'ordine del 1-3% sulla massa degli aggregati, nel caso dei conglomerati bituminosi. Dosaggi maggiori tendono a snaturare il comportamento della miscela che perderebbe le caratteristiche di un conglomerato bituminoso, avvicinandosi a quelle di un misto cementato.

Per il suo specifico processo d'idratazione e maturazione, tale elemento influenza le caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche delle miscele. La funzione principale è quella di aumentare la resistenza che è principalmente determinata dalla quantità di sostanza stabilizzante aggiunta, ma nel contempo 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. Il materiale trattato con una sostanza stabilizzante cementizia tende ad essere mediamente friabile. Aumentare la resistenza del materiale significa renderlo ancora più friabile, perciò la miscela

presenta una diminuzione delle proprie caratteristiche a fatica; in tale situazione le continue sollecitazioni dovute al carico esercitato dagli automezzi comportano inevitabilmente un aumento delle incrinature che rappresentano, ovviamente, una caratteristica negativa per lo strato di una pavimentazione stradale. E' quindi fondamentale che i requisiti di efficienza e le proprietà volumetriche e meccaniche dello strato stabilizzato vengano chiaramente indicate e che venga condotto uno studio adeguato delle miscele, allo scopo di determinare il corretto tasso di applicazione.

Un altro aspetto molto importante legato alla presenza del cemento nelle miscele stabilizzate a freddo con emulsione riguarda il contenuto d'acqua nell'impasto. Innanzitutto l'idratazione è necessaria per attivare il cemento e questo si può verificare solamente nelle miscele a freddo, per la disponibilità di acqua; l'eventuale assenza di quest'ultima condizionerebbe il comportamento del cemento che diventerebbe un semplice filler inerte. In secondo luogo la presenza di tale componente abbinata all'emulsione di bitume produce un effetto sinergico: l'idratazione sottrae acqua all'impasto e la reazione esotermica produce calore, favorendo la rottura dell'emulsione da un lato e la presa finale dall'altro. Ciò evidenzia l'importanza del cemento, anche come agente di adesione per il legante nelle miscele bituminose a base d'emulsione.

3.3 AGGREGATI E FILLER

In tutte le miscele impiegate nel campo stradale l'aggregato lapideo rappresenta la parte più importante, almeno in termini volumetrici. Una prima classificazione 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 non, vengono impiegati a seconda della loro origine 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 preferiti negli strati profondi, evidentemente per la scarsa possibilità di ricavarne elementi a spigoli vivi; negli strati di usura vengono utilizzate in maggioranza le rocce eruttive e metamorfiche. In generale le rocce più utilizzate e resistenti hanno una struttura fine 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, da resistenza all'abrasione e al mantenimento degli spigoli vivi e da rugosità non eccessiva, quindi sono spesso impiegati nei trattamenti di superficie. A queste due tipologie si aggiunge l'utilizzo di materiali riciclati e del conglomerato bituminoso di recupero, già introdotti nel Capitolo 1.

Una seconda classificazione degli aggregati lapidei che costituiscono lo scheletro degli strati di una sovrastruttura stradale è basata sulla dimensione granulometrica; in particolare si distinguono: pietrisco, pietrischetto e graniglia che rappresentano l'insieme degli aggregati grossi (granulometria maggiore di 4 mm), sabbie (grossa, media e fine) che compongono la famiglia degli aggregati fini ed hanno per definizione pezzatura compresa tra 2 e 0.063 mm. Il materiale passante al setaccio 0.063 mm è chiamato filler o additivo minerale.

3.3.1 CARATTERISTICHE

La normativa *EN 13043, Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico*, definisce i requisiti degli aggregati naturali, artificiali e riciclati (esclusi quelli fresati, ai quali si fa riferimento nella normativa *EN 13108: Miscele bituminose - Specifiche del materiale - Parte 8: Conglomerato bituminoso di recupero*) con cui si confezionano miscele bituminose e si realizzano trattamenti superficiali. Tale norma è il riferimento principale per la marcatura CE degli aggregati.

L'esame dei requisiti definiti dalla norma verrà condotto dividendo le proprietà del materiale in tre classi principali: *geometrica, fisico-meccanica e chimica*.

3.3.1.1 Proprietà geometriche

Un importante requisito geometrico dell'aggregato è la *distribuzione granulometrica* dell'assortimento dei granuli, determinata con la prova dell'analisi degli stessi, finalizzata alla designazione del materiale in termini di: dimensione d dello staccio limite inferiore, dimensione D di quello limite superiore e distribuzione percentuale in massa dei grani in base alle loro dimensioni. Tale analisi granulometrica è eseguita per stacciatura conformemente alla normativa EN 933-1 e a quella EN 933-2 utilizzando, a seconda della dimensione d/D dell'aggregato, stacci a maglia quadrata appartenenti alle serie specificate. All'interno dell'analisi granulometrica è importante anche definire il contenuto e la qualità dei fini.

Un altro fattore geometrico di rilevanza è la *forma dei granuli* dell'aggregato grosso, descritto mediante il *coefficiente di appiattimento* (EN 933-3) ed utilizzando, quando richiesto, anche l'*indice di forma* (EN 933-4). Sempre per quanto concerne

l'aggregato grosso, la Norma europea qualifica l'inerte anche in base alle percentuali di particelle costituenti il materiale rispettivamente frantumate, totalmente frantumate e totalmente arrotondate, poiché la presenza di particelle arrotondate o spezzate è un fattore che influenza la posa in opera delle miscele.

Relativamente all'aggregato fine, la Norma in esame permette di designare il materiale in base alla spigolosità, valutando il *coefficiente di scorrimento* Ecs, definito dalla EN 933-6 come la media di cinque singole determinazioni del tempo necessario a un determinato volume di materiale, di dimensione 0.063/2 mm o 0.063/4 mm, per defluire attraverso un'apertura di data ampiezza ($\emptyset = 12$ mm o $\emptyset = 16$ mm), servendosi di una apparecchiatura normalizzata.

3.3.1.2 Proprietà fisiche e meccaniche

Individuati i requisiti di un aggregato, necessari a qualificarlo dal punto di vista geometrico, la EN 13043 attribuisce al materiale un certo numero di categorie relative ai requisiti fisici e meccanici. Tra questi figura la *resistenza all'usura*, espressa per un aggregato grosso dal *coefficiente di usura Micro-Deval*. Esso è definito, in base alla EN 1097-1, come la percentuale del campione originale macinato per rotolamento ad una dimensione minore di 1.6 mm, all'interno di un tamburo rotante che compie 12.000 giri, in presenza di 2.5 l di acqua e di una carica abrasiva costituita da un numero sufficiente di sfere d'acciaio.

Un altro requisito fisico importante è la *resistenza alla frammentazione*, valutata nella EN 13043 mediante la categoria LA, legata al *coefficiente Los Angeles*. La prova, descritta in dettaglio nella EN 1097-2, consiste nella misura della perdita in peso per abrasione di un aggregato lapideo, soggetto all'azione di rotolamento e urto insieme a

delle sfere metalliche all'interno di un apposito cilindro. Il coefficiente Los Angeles è dato dalla perdita in peso riferita percentualmente al peso iniziale e viene espresso nella seguente forma:

$$LA = \frac{G_i - G_f}{G_i} \cdot 100 \quad (3.2)$$

dove

G_i = massa trattenuta su uno staccio da 1.6 mm, in grammi;

G_f = massa del trattenuto allo 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.

Un aggregato può venire qualificato in funzione della resistenza alla frammentazione, tramite assegnazione di una classe appartenente alla categoria SZ, in base al valore della *prova d'urto* (EN 1097-2). Tale valore è determinato, eseguendo la frantumazione di una porzione di prova composta dalle frazioni granulometriche 8/10 mm, 10/11.2 mm e 11.2/12.5 mm, mediante dieci colpi di martello impressi al materiale tramite il dispositivo di prova ed alla successiva valutazione della percentuale in massa di passante agli stacci di dimensione: 0.2 mm, 0.63 mm, 2 mm, 5 mm e 8 mm. Il grado di frantumazione della classe granulometrica 8/12.5 mm è espresso tramite il valore d'urto SZ calcolato con l'equazione seguente:

$$SZ = \frac{M}{5\%} \quad (3.3)$$

dove

M = somma delle diverse percentuali in massa di passante attraverso ciascuno dei cinque stacci di prova.

Relativamente ai manti superficiali in conglomerato bituminoso, la EN 13043 attribuisce all'aggregato grosso una delle classi relative alla categoria PSV, riferendosi al valore VL ottenuto dalla *prova di levigabilità* (EN 1097-8). Essa riproduce in laboratorio l'azione levigante dei pneumatici dei veicoli nei confronti dell'aggregato, sottoponendo quattro provini di classe granulometrica 7.2/10 mm, selezionati dallo stesso campione, prima all'azione levigante di una macchina per levigatura accelerata e successivamente alla prova d'attrito per conoscere lo stato di levigazione raggiunto da questi, al fine di calcolare il valore di levigabilità VL con l'equazione seguente.

$$VL = S + (52.5) - C \quad (3.4)$$

dove

S = media relativa ai quattro provini di aggregato;

C = media relativa ai quattro provini di pietra di verifica del VL.

A un aggregato può essere assegnata una delle classi di categoria AAV in funzione della *resistenza all'usura superficiale* causata dall'abrasione del traffico. Essa è misurata con la procedura illustrata nella norma EN 1097-8 su due provini selezionati dal medesimo campione di dimensione 10.2/14 mm opportunamente caricati, aventi granuli orientati e cementati con resina, che sono fissati ad una mola a rotazione orizzontale sulla cui superficie di contatto viene alimentato in continuo un aggregato abrasivo fine come, ad esempio, la sabbia. Dopo cinquecento giri della mola con velocità di 28-31 rotazione/min, il valore di abrasione dell'aggregato AAV è determinato con la relazione seguente, considerando la variazione della massa dei provini prima e dopo l'abrasione e la massa volumica dei granuli saturi a superficie asciutta del campione:

$$AAV = \frac{3 \cdot (A - B)}{\rho_{ssd}} \quad (3.5)$$

dove

A = massa del provino prima dell'abrasione, in g;

B = massa del provino dopo l'abrasione, in g;

ρ_{ssd} = massa volumica dei granuli saturi a superficie asciutta, in Mg/m³.

L'aggregato grosso può essere qualificato in base alla *resistenza all'abrasione da pneumatici chiodati*, rappresentata dal valore di abrasione nordica (EN 1097-9). Esso si determina facendo rotolare una porzione di prova con massa di 7.000 g ottenuta dalla miscelazione delle frazioni granulometriche 11.20/14 mm e 14/16 mm, unitamente a sfere di acciaio e 2 l d'acqua, nella cavità di un cilindro rotante, alla velocità di 90 giri al minuto per 5.400 giri. Al termine del numero di giri specificato, il contenuto viene rimosso dal cilindro e la porzione di prova viene vagliata agli stacci di dimensione 14 mm, 8 mm e 2 mm, in modo tale da calcolare l'usura A_N per singola prova tramite la formula seguente:

$$A_{NSingola\ prova} = \frac{100(m_i - m_2)}{m_i} \quad (3.6)$$

dove

m_i = massa iniziale a secco del provino, espressa in g;

m_2 = somma delle masse a secco delle tre frazioni trattenute sui tre stacci dopo la prova, espressa in g.

Il coefficiente di abrasione scandinavo si calcola come media di più determinazioni.

Parametri fisico-meccanici importanti sono le masse volumiche, di cui si distinguono le seguenti definizioni (EN 1097-6):

- *massa volumica apparente dei granuli* ρ_a : rapporto tra la massa del campione di aggregato essiccato e il suo volume occupato in acqua, compreso ogni vuoto interno non accessibile, ma esclusi i pori accessibili all'acqua;
- *massa volumica del granulo saturo a superficie asciutta* ρ_{ssd} : rapporto della massa complessiva del campione di aggregato e di acqua nei pori accessibili e il volume occupato in acqua, compresi sia i vuoti interni non accessibili, sia i vuoti accessibili all'acqua, se presenti;
- *massa volumica dei granuli preessiccati* ρ_{rd} : rapporto fra la massa preessiccata del campione di aggregato e il volume occupato in acqua, compresi eventuali vuoti interni non accessibili, ma escludendo quelli accessibili all'acqua.

Nello studio del mix design di una miscela bituminosa l'unica massa volumica che si desidera conoscere per l'aggregato è la massa volumica apparente ρ_a , definita dall'equazione seguente:

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (3.7)$$

dove

M_1 = massa in aria del campione essiccato in stufa, in g;

M_2 = massa apparente in acqua del cestello con campione saturo, in g;

M_3 = massa apparente in acqua del cestello vuoto, in g;

ρ_w = massa volumica dell'acqua alla temperatura registrata all'atto della valutazione di M_2 , in Mg/m³.

Oltre alle masse volumiche previste dalla EN 1097-6, viene specificata per un

aggregato anche la *massa volumica in mucchio* ρ_b , determinata secondo la EN 1097-3 mediante pesatura, dopo essiccazione, della massa di una porzione di prova contenuta in un recipiente cilindrico stagno, il cui volume aumenta con il crescere della dimensione superiore dell'aggregato.

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.8)$$

dove

ρ_b = massa volumica in mucchio, in Mg/m³;

m_2 = massa del recipiente e del provino, in kg;

m_1 = massa del recipiente vuoto, in kg;

V = capacità del recipiente, in l.

Altra caratteristica importante da valutare è la *durabilità*, considerando come prova di selezione per la resistenza al gelo/disgelo il valore di *assorbimento d'acqua* valutato col metodo del cestello a rete, ossia portando i granuli alla condizione di saturazione tramite immersione in acqua senza ottenere la massa costante (EN 1097-6 punto 7), oppure protraendo l'assorbimento fino al raggiungimento di quest'ultima (EN 1097-6 appendice B). Nel primo caso l'aggregato si ritiene resistente al gelo/disgelo quando il valore dell'assorbimento d'acqua non è maggiore dell'1% oppure del 2%; nel secondo, invece, il materiale resiste al gelo/disgelo per valori di assorbimento d'acqua che non superino il valore massimo di 0.5 cm.

La *perdita di resistenza* che il materiale subisce a causa dei cicli di gelo/disgelo può essere determinata secondo la EN 1367-1, considerando la perdita di massa delle frazioni di prova degli aggregati a granulometria costante omogenea in seguito alla loro immersione in acqua a pressione atmosferica ed all'azione di dieci cicli di congelamento a -17.5°C e scongelamento a 20°C, terminati i quali si valutano

eventuali modifiche delle porzioni di prova. L'equazione seguente consente il calcolo della perdita di massa, in funzione della percentuale di passante allo staccio di dimensione pari alla metà della dimensione inferiore dei campioni:

$$F = 100 \frac{M_1 - M_2}{M_1} \quad (3.9)$$

dove

M_1 = massa totale iniziale di tre campioni di prova essiccati, in g;

M_2 = massa totale finale di tre campioni di prova essiccati, trattenuta sullo specifico staccio, in g;

F = perdita percentuale di massa dei tre campioni di prova dopo i cicli gelo e disgelo.

La perdita di resistenza meccanica dovuta al gelo-disgelo può essere determinata anche basandosi sulla diminuzione di massa che un campione di dimensione 10/14 mm subisce dopo essere stato sottoposto a cinque cicli d'immersione in una soluzione satura di solfato di magnesio, seguita da essiccazione in forno (EN 1367-2) e quindi avendo subito gli effetti dirompenti del processo di cristallizzazione e successiva idratazione del solfato di magnesio all'interno dei vuoti interstiziali. Tale degradazione è misurata dalle particelle di materiale aventi dimensione inferiore a 10 mm ed è rappresentata per l'aggregato conformemente alla relativa categoria MS.

Per l'aggregato può essere determinata la diminuzione di *resistenza a causa dello shock termico* subito dal materiale saturo, previo il riscaldamento del campione a 700°C per 3 minuti e successiva misurazione della percentuale di passante allo staccio da 5 mm, o valutazione della riduzione della resistenza alla frammentazione

con il coefficiente Los Angeles.

Si possono inoltre dichiarare in conformità alla EN 12687-11 i risultati della *prova di affinità degli aggregati grossi ai leganti bituminosi* e, laddove siano rilevati *segni di "Sonnenbrand"*; è necessario effettuare un esame visivo su singoli pezzi di roccia basaltica ed una bollitura, per almeno 36 ore all'interno di un recipiente in acciaio riempito con acqua, di un campione a granulometria selezionata, terminata la quale si valuta la perdita di percentuale di massa e la diminuzione di resistenza da dichiararsi in conformità alla categoria SB, mediante prova d'urto oppure con prova Los Angeles.

3.3.1.3 Proprietà chimiche

La qualificazione dell'aggregato in base ai requisiti chimici elencati nella norma EN 13043 avviene valutando la *composizione chimica* dei granuli e la *presenza di contaminanti organici leggeri grossi*, con dimensione maggiore di 2 mm, il cui contenuto viene stabilito immergendo 350 g di aggregato fine in 1 l di soluzione di cloruro di zinco o di politungstato di sodio. Tale soluzione provoca la flottazione delle particelle aventi massa volumica inferiore a 2 mm, facilitando la loro rimozione e la quantificazione della percentuale di questi componenti necessaria all'individuazione della relativa categoria mLPC.

L'aggregato *contenente scorie d'altoforno* raffreddate ad aria, deve essere libero dalla disintegrazione del silicato dicalcico e ferroso, il primo fenomeno dei quali viene valutato esponendo le particelle alla luce ultravioletta e registrando come sospette rispetto alla disintegrazione le loppe che mostrano punti luccicanti grandi o piccoli di colore giallo, bronzeo o cannella; il secondo si produce in acqua quando uno o più

pezzi di loppa si fessurano (EN 1744-1).

In presenza di *scorie di acciaio* deve essere garantita la stabilità volumetrica dell'aggregato, irrorando quest'ultimo con un getto di vapore a 100°C che facilita la reazione con calce libera ed ossido di magnesio, con conseguente incremento del volume. Il campione si ritiene volumetricamente stabile quando l'espansione non è maggiore del valore massimo dichiarato in conformità alla categoria V.

3.3.2 FILLER

Si definisce filler la parte più fine degli aggregati (passante al setaccio 0.063 mm) 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. Quest'ultimi tipi di filler sono denominati attivi poiché alterano chimicamente le proprietà del mix e si differiscono da quelli naturali, come la farina di roccia, il cui scopo è ridotto all'integrazione della frazione fine della miscela per facilitare la dispersione del bitume.

3.3.2.1 Caratteristiche

Durante la fase di studio della miscela è opportuno valutare tutte le caratteristiche del filler per poter operare la scelta più adeguata, pertanto è

necessario considerare:

- *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 una massa nota del filler in esame, nell'acqua e nel 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.

3.3.2.2 Influenza del filler sulle proprietà reologiche del legante

L'aggiunta del filler nel legante influisce sulle sue caratteristiche reologiche; la ricerca ha 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 il suo aumento. L'adesione a pietre asciutte aumenta con la percentuale di additivo al di sopra di determinate soglie. Tali variazioni di comportamento possono essere evidenziate sul bitume e sulle miscele bitume-filler mediante le prove di penetrazione alle varie temperature.

Con riferimento ai materiali stabilizzati a bitume, le ragioni per cui è necessario

incorporare filler attivo sono elencate di seguito:

- migliorare l'adesione del bitume all'aggregato;
- migliorare la dispersione del bitume nel mix;
- modificare la plasticità dei materiali naturali, riducendola;
- aumentare la rigidità del mix e la velocità di sviluppo della resistenza;
- accelerare la maturazione del mix compattato.

3.3.3 RUOLO DELLA GRANULOMETRIA

La composizione granulometrica è uno dei fattori principali, che influenza le proprietà volumetriche e meccaniche delle miscele; sia che si tratti di materiale conglomerato bituminoso di recupero, sia che si tratti di materiale vergine, è necessario lo studio e il progetto della curva granulometrica degli aggregati.

Nel caso analizzato il materiale principale di una miscela riciclata a freddo con emulsione di bitume e cemento è il fresato. Il RA, essendo costituito per il 93-97% in massa da aggregati litici e per il resto da bitume invecchiato, va considerato a tutti gli effetti come un aggregato. Il materiale fresato in sito deve essere campionato (facendo riferimento a sezioni stradali significative, ubicate ad una distanza di circa 300-400 m) ed occorre determinare la curva granulometrica in laboratorio, in modo da stabilire le percentuali di passante ai vari setacci. Poiché il RA da sottoporre alle analisi granulometriche deve essere rappresentativo del materiale costituente la vecchia pavimentazione, è opportuno utilizzare la stessa fresatrice che si impiega per l'intervento previsto, operando alle stesse condizioni (velocità di avanzamento e spessore interessato).

Al termine di questa importante operazione si valuta la necessità di un'eventuale correzione affinché la curva granulometrica rientri nei fusi prescritti dai diversi riferimenti normativi; se la curva granulometrica del RA non rientra nel fuso prescritto, si può operare in due modi:

- aggiungere la miscela con aggregati vergini;
- declassare 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 RA risulti eccessiva, generalmente non dovrebbe superare il 6% in massa del fresato (quantitativi eccessivi di bitume, anche se invecchiato, rischierebbero di alterarne il comportamento, provocando deformazioni plastiche). Questo problema in realtà si presenta principalmente nella scarifica superficiale e non in quella profonda, dove spesso si arrivano a fresare strati di misto granulare, privo addirittura di legante.

La fresatura produce un notevole quantitativo di materiale fine, che può superare anche 15% in massa del RA, in parte costituito da aggregati veri e propri ed in parte da bitume (questo valore è altamente variabile a seconda del tipo di fresa e delle modalità di scarifica). Tale percentuale necessita di correzioni al fine di far rientrare il quantitativo 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 blocchi di conglomerato bituminoso, detti "croste". Per ottenere una miscela il più possibile omogenea si deve evitare la presenza di queste ultime,, limitandone le dimensioni massime (che in genere non

debbono superare 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 la frazione fine della miscela, si sottolinea che anche il cemento incrementa tale percentuale rientrandovi in qualità di filler. Il filler minerale, a differenza di quello in cemento, rimane chimicamente inerte, mentre il secondo reagisce chimicamente e 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 e promuovendo e accelerando determinati processi. Occorre inoltre osservare che un eccesso di frazione fine può provocare la "chiusura" del conglomerato bituminoso, ossia una bassa percentuale di vuoti, con i problemi che ne conseguono. Il fenomeno non è in realtà da imputare alle miscele stabilizzate con emulsione poiché tale legante, essendo ricco di acqua (35-40% in massa sull'emulsione) non produce una compattazione eccessiva, presentando un tasso di vuoti elevato, solitamente superiore al 12-12.5% in volume della miscela.

Altro aspetto da valutare è che un elevato contenuto di fine incrementa in maniera sensibile la superficie specifica offerta dagli aggregati e conseguentemente la velocità di rottura dell'emulsione; inoltre la presenza di questa porzione realizza con l'emulsione una pasta viscosa, mentre gli aggregati più grossi tendono a non essere completamente rivestiti dal legante organico. Anche il cemento contribuisce a questo processo di amalgama con l'emulsione, analogamente a quanto avviene per 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 rifluire del bitume, soprattutto negli strati più alti del pacchetto stradale. La Tabella 3.9 e la Figura 3.17 riportano i campi granulometrici identificati dal *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 3.9: Campi granulometrici ideali ed accettabili per materiali stabilizzati a bitume.

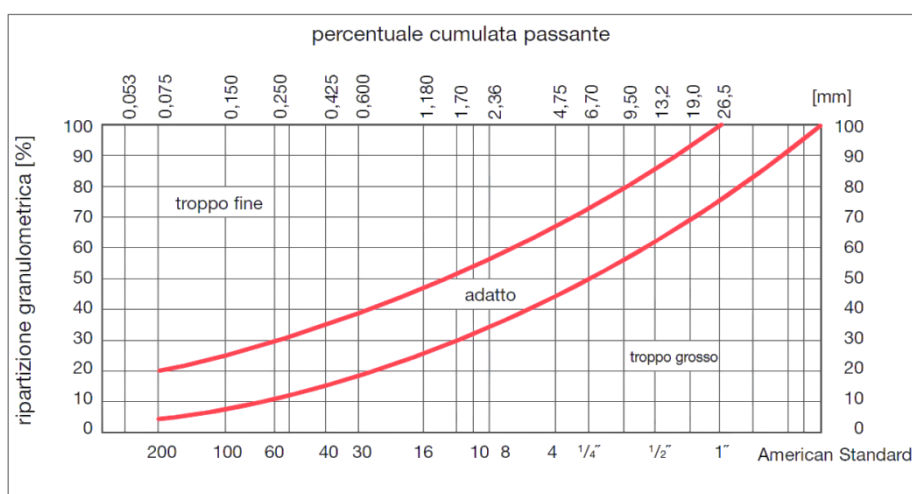


Figura 3.17: Campi granulometrici ideali ed accettabili per materiali stabilizzati a bitume.

3.4 ACQUA

L'acqua che si trova in natura può non risultare adatta ad essere impiegata in un materiale stabilizzato con emulsione e cemento a causa delle impurità in essa presenti, sia in soluzione, sia in sospensione; in particolare, l'eventuale presenza di ioni positivi e negativi può influenzare le proprietà delle emulsioni di bitume. L'acqua impiegata deve quindi essere esente da impurità dannose, oli, acidi, alcali, materia organica e qualsiasi altra sostanza nociva che possa alterare le proprietà della miscela e influire negativamente sui processi necessari per la sua maturazione.

Per creare una miscela soddisfacente è necessario introdurre il giusto quantitativo d'acqua e per poter ottenere la massima densità della stessa si deve verificare mediante prove di costipamento in laboratorio (ad esempio prova Proctor) la quantità ottima di acqua, che per i conglomerati riciclati a freddo si aggira generalmente intorno a 5-7% rispetto alla massa del fresato.

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, da quella eventualmente compresa nella boiaccia cementizia e dall'umidità del fresato, estremamente variabile a seconda delle condizioni atmosferiche. Il quantitativo totale di acqua è dato dalla somma dell'umidità degli aggregati, dall'acqua presente nell'emulsione e da quella di pre-bagnatura (eventualmente spruzzata sotto forma di slurry assieme al cemento nella camera di miscelazione).

3.4.1 RUOLO DELL'ACQUA

L'acqua costituisce un fattore chiave poiché regola l'addensabilità e la lavorabilità della miscela, i meccanismi di rottura dell'emulsione, la presa e l'indurimento della frazione cementizia e i tempi di riapertura al traffico.

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. Separando inoltre le particelle fini e sospendendole in un mezzo liquido, essa crea dei canali attraverso i quali penetrerà il legante, che poi andrà a rivestire le particelle minerali; un'eccessiva quantità d'acqua può quindi avere conseguenze negative sulla copertura degli aggregati da parte della fase legante.

In secondo luogo, 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. La lavorabilità della miscela è funzione dell'umidità della miscela: una maggiore umidità implica una migliore lavorabilità. L'emulsione bituminosa, che si presenta in uno stato liquido, da sola può non essere sufficiente a fornire adeguata lavorabilità. D'altronde, adottare maggiori percentuali d'emulsione comporta un aumento delle difficoltà nel processo di lavorazione. Anche la presenza del cemento nella miscela non agevola tale proprietà. Per ovviare a tale inconveniente si può operare incrementando il contributo di acqua nell'impasto, pur nel rispetto dei quantitativi ottimali. È evidente che tenori di acqua superiori all'ottimo agevolano notevolmente la lavorabilità del conglomerato, rendendolo più fluido; tuttavia un eccesso di liquidi tende a limitare

l'addensabilità, poiché l'incompressibilità del liquido si oppone all'azione compattante dei mezzi d'opera, pregiudicando le proprietà meccaniche e la durata della miscela.

Da ultimo, l'intrinseca impermeabilità all'acqua ed all'aria degli strati che costituiscono la pavimentazione 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. Anche questo aspetto sottolinea l'importanza di un corretto dosaggio del quantitativo d'acqua nella miscela

3.5 ADDITIVI

Gli additivi sono prodotti naturali o di sintesi chimica che, aggiunti agli aggregati o al legante, consentono di migliorare le prestazioni delle miscele. Tra gli additivi chimici rientrano anche i cosiddetti *rigeneranti*. Questi vengono accorpati o affiancati all'emulsione ed il loro scopo è quello di rigenerare il bitume invecchiato presente nel fresato.

Tali sostanze, dette anche ACF (agenti chimici funzionali) o ringiovanenti, sono ricche dei 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, recuperando di conseguenza una certa duttilità e da ridurre la fragilità alle basse

temperature.

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); essi con acqua realizzano un'emulsione che, nonostante i modesti dosaggi (2.5% in massa sul fresato), dovrebbe essere in grado di rigenerare il vecchio bitume. Le caratteristiche chimico-fisiche sono illustrate nella Tabella 3.10.

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 3.10: Caratteristiche chimico-fisiche degli ACF.

Alcuni autori criticano la validità degli agenti rigeneranti, perché probabilmente queste sostanze funzionano meglio quando le condizioni climatiche sono favorevoli ed in particolare quando le temperature sono più elevate (è dimostrato che gli ACF funzionano bene nel caso di riciclaggio a caldo). In aggiunta, l'azione di tali additivi necessita di un lasso di tempo relativamente lungo affinché essi riescano a riattivare 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 ad analoghe miscele riciclate a caldo.

CAPITOLO 4:

PROGRAMMA SPERIMENTALE E MATERIALI

4.1 PROGETTO DI RICERCA

L'indagine sperimentale proposta in questa dissertazione è stata interamente condotta presso il Laboratorio di Strade LAS del dipartimento DICAM (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali), Facoltà di Ingegneria dell'Università Alma Mater Studiorum di Bologna. La ricerca si è concentrata sulle applicazioni di materiali forniti da società esterne, interessate alla possibilità di utilizzo, in campo stradale, del polverino di gomma ottenuto dalla frantumazione degli pneumatici fuori uso (PFU).

In questo capitolo si fornisce la descrizione degli obiettivi della ricerca e del programma sperimentale, riportando l'organizzazione delle diverse fasi operative, nonché la descrizione del progetto delle miscele e dei materiali utilizzati. Dapprima si definisce il polverino di gomma, quindi i diversi impieghi nel campo stradale e le modalità di produzione.

4.1.1 POLVERINO DI GOMMA

Nel paragrafo 1.4 si è già ampiamente discusso il tema della gestione e del recupero degli pneumatici fuori uso (PFU). Tra le tecnologie di riciclo e trattamento più diffuse si ha la granulazione a temperatura ambiente, anche se ultimamente sta cominciando ad affermarsi quella criogenica. Il polverino è il risultato del trattamento della gomma per ottenere particelle finemente disperse, con dimensioni inferiori a 1 mm (Figura 4.1). Esso si distingue dal granulato di gomma che è caratterizzato da dimensioni superiori, comprese nell'intervallo 1-10 mm.



Figura 4.1: Polverino di gomma.

I principali utilizzi includono: soles di scarpe, impianti sportivi, rivestimenti per cavi elettrici, ricambi per automobili, coloranti, inchiostri, leganti bituminosi, rivestimenti e sigillanti, pavimentazioni, ecc. Nella maggioranza dei casi il polverino rappresenta un ingrediente di un composto all'interno del quale esso viene miscelato insieme a materiali vergini. In un secondo tempo il polverino è stato usato nella

realizzazione di strade o come materiale di rivestimento aggiunto ad un solvente, in modo da formare una sospensione in gomma. Tale prodotto viene utilizzato come impermeabilizzante e può essere utilizzato come vernice, spray o come bagno in cui immergere il manufatto, affinché quest'ultimo acquisisca proprietà impermeabilizzanti.

4.1.1.1 Processi di produzione del conglomerato con l'impiego di gomma

I processi adottati per la realizzazione del conglomerato bituminoso con granulato o polverino di gomma sono due: l'uno definito *processo "wet"*, che consiste nell'aggiungere la gomma, generalmente sotto forma di polverino, al bitume, ottenendo così un legante modificato; l'altro, denominato *processo "dry"*, che prevede l'uso sia del polverino sia della gomma granulata in forma di aggregato, ad integrazione di quello tradizionale, dando luogo a un conglomerato bituminoso additivato a caldo. La percentuale di gomma utilizzata rappresenta una variabile importante per le proprietà reologiche e meccaniche del prodotto finale in entrambi i processi.

La quantità di gomma che generalmente viene aggiunta, durante il *processo wet* è compresa tra il 10 ed il 30% in massa del legante: si riscontra che valori superiori al 10% ampliano il campo di temperatura di applicazione del conglomerato realizzato, mentre percentuali inferiori agiscono esclusivamente sulle alte temperature. Il processo *wet* non comporta modifiche significative al normale impianto di produzione di conglomerato a caldo, non dovendosi adottare speciali apparecchiature per la preparazione e applicazione del materiale. Tale processo può essere discontinuo (bitume e polverino vengono mescolati all'atto della produzione del

conglomerato), ovvero continuo (produzione continua di bitume modificato con gomma). La gomma, come elemento di costituzione del polverino, in definitiva conferisce al legante una migliore elasticità e flessibilità, mentre gli antiossidanti, stabilizzanti e riempitivi ne ritardano l'invecchiamento.

Il *processo dry* implica un maggiore consumo di gomma di circa dieci volte superiore a quella che ottimizza il processo *wet*. Ciononostante, il processo *dry* riscuote un minor successo in campo applicativo; ciò è attribuibile alla necessità di un'accurata preparazione del conglomerato, all'adozione di specifiche condizioni di stesa e costipamento, all'idonea ed accurata formulazione della curva granulometrica di progetto.

Diverse applicazioni hanno messo in evidenza che i leganti modificati con gomma manifestano prestazioni superiori ai leganti tradizionali e a volte anche a quelli modificati con altri additivi (polimeri). Con il processo *wet*, infatti, si ottiene un legante di caratteristiche reologiche migliorate rispetto al bitume originario, in virtù della maggiore densità, del più alto punto di rammollimento, della minore suscettività termica, della maggiore resistenza allo scorrimento, del minore invecchiamento, della più bassa tendenza alla fessurazione nei climi freddi, dell'ottima impermeabilità all'acqua e all'adesione all'aggregato. Questi requisiti rendono i leganti particolarmente idonei all'uso in alcune applicazioni quali ad esempio i conglomerati drenanti che, richiedendo cospicue quantità di legante, rischiano di penalizzare la resistenza allo scorrimento e la stabilità della miscela stessa. Importante è la capacità della gomma di assicurare al legante le proprietà adesive (oltre che coesive), carenti invece nell'uso di altri rifiuti speciali quali le plastiche, oppure stazionarie per altri additivi di uso comune (polimeri).

Nel processo *dry* le particelle di gomma fungono da microammortizzatori visco-elastici e migliorano la risposta del conglomerato alle sollecitazioni, impedendo, per effetto dell'assorbimento di una frazione del bitume, fenomeni di sgranamento. In esercizio l'impiego della gomma nei conglomerati bituminosi ha prodotto benefici in termini di aumento della vita utile delle pavimentazioni, d'incremento della resistenza al gelo, di miglioramento dell'aderenza, di riduzione del fenomeno di aquaplaning, del rumore di rotolamento, della risalita delle fessurazioni presenti negli strati. È importante citare, inoltre, che nel 1996 la *Federal Highway Administration* ed il *National Institute of Occupational Safety and Health* hanno avviato studi sulle tecnologie di utilizzo, sui costi di produzione e, soprattutto, sulla compatibilità ambientale e sui rischi per la salute riguardo alle operazioni di lavorazione dei conglomerati; i risultati, confermati da successivi studi, non hanno pregiudicato l'impiego del nuovo materiale nel confezionamento dei conglomerati bituminosi; anzi hanno rivelato come alcuni elementi inquinanti vengano emessi in percentuale minore, o addirittura abbattuti, rispetto a quanto avviene durante la lavorazione dei conglomerati bituminosi di tipo tradizionale.

Come anticipato, le lavorazioni per la realizzazione del polverino di gomma si distinguono in *granulazione tradizionale* e *criogenica*. Nei due paragrafi successivi si fornisce la descrizione di tali processi.

4.1.1.2 Granulazione tradizionale

In questa tecnologia tutte le fasi di triturazione e granulazione vengono effettuate a temperatura ambiente; il processo di macinazione meccanica avviene per fasi successive ed è effettuato mediante 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 detti prodotti si ottengano dagli pneumatici di auto o di autocarro. Per questi 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. Il processo produttivo inizia con una triturazione grossolana degli pneumatici; i frammenti ottenuti, tramite un sistema di nastri trasportatori che operano a peso (Figura 4.2), vengono condotti in altre camere di triturazione in cui vengono sminuzzati al fine di ottenere resti sempre più piccoli.



Figura 4.2: Impianto di triturazione degli pneumatici.

Durante le varie fasi di macinazione, con il progredire della riduzione della dimensione del prodotto, si provvede a separare e ad asportare in uno o più momenti successivi il metallo e la fibra tessile. L'assenza di trattamenti chimici o termici

mantiene inalterata la struttura molecolare del materiale polimerico.

Le operazioni di taglio con lame metalliche sono predominanti e vengono effettuate in fasi successive, riducendo la dimensione della gomma di stadio in stadio. La ruvidezza della superficie ottenuta è prevalentemente correlata allo stato di usura delle lame durante il processo produttivo. Lame nuove e affilate permettono di ridurre la ruvidità del granulato, se paragonato a quello ottenuto con lame consumate. Nel caso di un prolungato utilizzo delle lame la vita dell'unità di granulazione si riduce notevolmente.

Tutti i frammenti ottenuti vengono portati in opportune setacciatrici, dove vengono suddivisi in base alla granulometria che si vuole ottenere (Figura 4.3). La vagliatura permette quindi di ottenere prodotti classificati in maniera diversa, per corrispondere alle specifiche richieste dall'applicazione. Il prodotto finale viene confezionato al momento o stoccato in silos.



Figura 4.3: Vagliatura del polverino di gomma.

4.1.1.3 Granulazione criogenica

Nella granulazione criogenica le fasi iniziali di lavorazione sono identiche a quelle della granulazione tradizionale. Nella Figura 4.4 seguente si riporta uno schema generale del funzionamento di un impianto di granulazione criogenica.

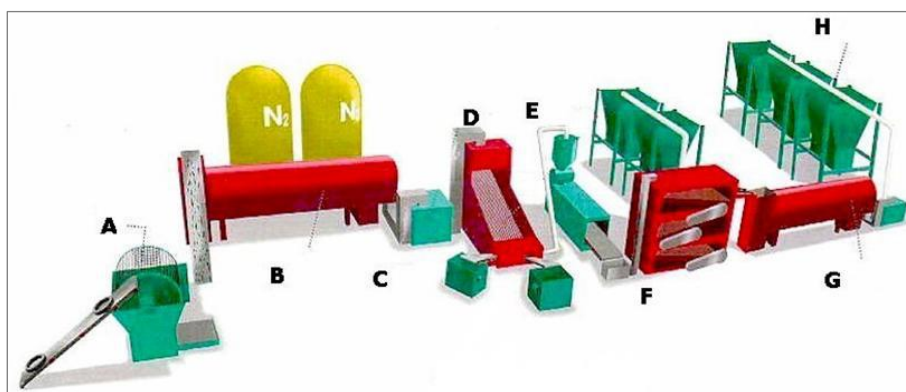


Figura 4.4: Funzionamento di un impianto di granulazione criogenica.

Il processo inizia 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 5 mm, sono raffreddati in un tunnel di raffreddamento che opera in continuo (B) fino a -80°C (o temperature inferiori), utilizzando dell'azoto liquido e portando la gomma ad uno stadio vetroso. 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 tritурata e sminuzzata. In un secondo momento i frammenti vengono fatti cadere in un mulino a martelli che opera ad una elevata velocità di rotazione (C). Qui essi 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 che escano dal

mulino e vengano 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).

Le particelle di gomma ottenute tramite lavorazione criogenica hanno una superficie più uniforme, se confrontate con quelle ottenute con la granulazione a temperatura ambiente. La pezzatura del granulo ottenuto con il primo procedimento risulta più fine e tendenzialmente più pulita di quella ottenuta con la lavorazione a temperatura ambiente. Gli altri parametri di confronto tra le due tecnologie sono riportati in Tabella 4.1.

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 4.1: Confronto tra la lavorazione criogenica e quella a temperatura ambiente.

Attualmente in Europa meno dell'1% di granulati di gomma viene prodotto con la tecnologia criogenica. Le ragioni sono le seguenti: la tecnologia è più vantaggiosa per produrre polverini di dimensioni inferiori a 0.4 mm, l'azoto liquido è costoso e deve essere usato in quantità ingente durante il processo produttivo, il prezzo medio dei granulati di dimensioni comprese tra 0.5 e 2.2 mm è attualmente superiore di oltre il

130% rispetto a quello realizzato con il procedimento a temperatura ambiente. Bisogna quindi valutare se il vantaggio di ottenere un prodotto più regolare e più fine possa sopperire allo svantaggio economico.

In ogni caso si tratta di due processi industriali che richiedono investimenti di rilievo, stimati nell'ordine di costi che vanno da 1.5 a 5 milioni di euro. Gli impianti sono complessi e delicati e incorporano tecnologia specifica ed esclusiva; in caso di blocco dell'attività essi non sono riconvertibili per altre produzioni e quindi devono essere dismessi, con rilevanti danni economici, perdita di posti di lavoro e negative conseguenze sulle aziende utilizzatrici.

4.1.2 OBIETTIVO DELLA SPERIMENTAZIONE

La presente ricerca vuole valutare la possibilità di impiegare con successo tecnologie a freddo ecocompatibili nelle quali sia previsto l'uso congiunto di conglomerato bituminoso di recupero e di polverino di gomma; l'obiettivo è quello di concentrare l'attenzione sulla minimizzazione dell'impatto ambientale relativo ad alcune applicazioni tipiche del settore stradale. Sebbene, infatti, il recupero degli pneumatici fuori uso sotto forma di polverino di gomma sia una pratica già oggetto di ricerca e applicazione nella produzione di leganti modificati e conglomerati bituminosi a caldo (come illustrato nel paragrafo 4.1.1.1), l'introduzione di tale materiale nel campo delle tecnologie di produzione a freddo rimane nel campo della sperimentazione innovativa, che necessita ancora di studi ed analisi approfondite. Scarsi o addirittura inesistenti sono infatti i riferimenti in tale settore.

La presente sperimentazione si inserisce in tale contesto e si prefigge lo scopo di

fornire indicazioni in merito all'utilizzo del polverino di gomma come aggregato all'interno di miscele confezionate tramite tecnica di stabilizzazione a freddo, con emulsione di bitume e cemento, e contenente il 100% di materiale fresato. In particolare lo studio concentra l'attenzione sugli effetti che la granulometria, le percentuali di legante bituminoso e cementizio, le quantità e il tipo di polverino, la maturazione e le diverse variabili in gioco hanno nei confronti delle principali caratteristiche meccaniche della miscela: lavorabilità, addensabilità, resistenza a trazione indiretta, rigidità e proprietà a fatica.

4.1.3 ARTICOLAZIONE GENERALE

Il progetto di ricerca si articola in tre fasi principali, di seguito elencate:

- **Fase 1: Organizzazione del progetto di ricerca**
 - Definizione degli obiettivi e del programma sperimentale.
 - Progetto della miscela e caratterizzazione dei materiali.
- **Fase 2: Analisi di prequalifica**
 - Confezionamento dei provini.
 - Analisi delle proprietà volumetriche delle miscele.
 - Caratterizzazione meccanica tramite prova di resistenza a trazione indiretta ITS (*Indirect Tensile Strength*).
- **Fase 3: Caratterizzazione meccanica dinamica**
 - Prova per la determinazione del modulo di rigidità ITSM (*Indirect Tensile Stiffness Modulus*).
 - Prova per la determinazione della resistenza a fatica ITFT (*Indirect*

Tensile Fatigue Test).

4.1.3.1 Fase 1: progetto della miscela e caratterizzazione dei materiali

Il progetto della miscela è il punto di partenza della sperimentazione tramite la quale si definiscono le caratteristiche del prodotto. Sulla base dei materiali forniti si progettano le percentuali di aggregati da utilizzare, il contenuto ottimale di umidità, le quantità di legante bituminoso e cementizio e, infine, i tenori e le modalità di aggiunta del polverino di gomma nelle due tipologie (tradizionale TCR e criogenica CCR).

4.1.3.2 Fase 2: analisi di prequalifica

L'analisi di prequalifica rappresenta un momento determinante e particolarmente delicato della sperimentazione perché consente di comprendere le variabili coinvolte, la loro interazione e di avere un approccio selettivo al problema.

In primo luogo si procede al confezionamento in laboratorio dei provini e all'analisi delle proprietà di addensamento e di lavorabilità delle miscele. In pratica il primo passaggio è la validazione delle scelte progettuali sulla base delle caratteristiche volumetriche dei campioni.

In seguito si procede ad un confronto tra le miscele tramite una caratterizzazione meccanica tradizionale; il parametro comparativo oggettivo è il valore di resistenza a trazione indiretta ITS. L'obiettivo delle prove di trazione indiretta è duplice: da un lato esse valutano se la presa e l'indurimento del cemento, principale responsabile della rigidità sviluppata, siano condizionati dalla presenza dell'emulsione bituminosa e come quest'ultima incida su tale proprietà meccanica;

dall'altro considerano l'influenza dell'aggiunta del polverino di gomma alle miscele e le eventuali modifiche apportate rispetto alle miscele di stampo tradizionale, senza polverino.

4.1.3.3 Fase 3: caratterizzazione meccanica dinamica

Ad una selezione di primo livello, effettuata tramite la Fase 2 di prequalifica, segue una Fase 3 di caratterizzazione meccanica con approccio prestazionale. In tale studio solo una parte delle tipologie di miscele, individuate su base oggettiva dai risultati dell'analisi di prequalifica, è soggetta ad esame.

Gli strati di una pavimentazione stradale sono sottoposti a carichi di breve durata ogniqualvolta sul piano viabile transiti un veicolo. La conoscenza della risposta del materiale a sollecitazioni di laboratorio che simulino tali carichi è importante per il dimensionamento degli strati stessi e per una corretta selezione della miscela da impiegare. In aggiunta, va tenuto presente che il susseguirsi e l'entità delle sollecitazioni dovute al traffico veicolare variano in funzione delle frequenze di transito e della tipologia dei mezzi. La vita utile dello strato della pavimentazione è definita come il numero di ripetizioni di carico che portano alla rottura del materiale e la resistenza a fatica rappresenta, dunque, una condizione da verificare e soddisfare nell'ambito dei vari metodi di progettazione delle pavimentazioni stradali.

Lo studio fornisce indicazioni sui parametri e le caratteristiche meccaniche di tipo dinamico, in particolare sul modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta, sulla sensitività termica delle miscele e sulle caratteristiche di resistenza a fatica, evidenziando le differenze meccaniche e comportamentali relative all'utilizzo del polverino di gomma tradizionale e criogenico, rispetto a miscele senza polverino.

4.2 PROGETTO DELLA MISCELA

In questo paragrafo s'illustra più nel dettaglio la Fase 1 del progetto di ricerca. Le Fasi 2 e 3 sono riportate nei capitoli seguenti.

4.2.1 MISCELE

Le miscele vengono confezionate prendendo in considerazione due tenori di cemento (1.5% e 3.0%) e due tenori di emulsione bituminosa (3.5% e 5.0%). In entrambi i casi tali percentuali sono state calcolate rispetto alla massa degli aggregati. La scelta di tali intervalli, se da un lato prende in considerazione i quantitativi di utilizzo della pratica comune e di esperienze sperimentali di letteratura, dall'altro intende massimizzare e minimizzare l'impiego di tali leganti per poter cogliere il contributo che ciascuno di essi offre all'interno della miscela in termini di proprietà volumetriche e meccaniche.

Per quanto riguarda il polverino di gomma, volendo analizzare come i due tipi di tale materiale con le loro differenti composizioni granulometriche influiscano sul comportamento e sulle caratteristiche delle miscele, si è deciso di procedere aumentando gradualmente la percentuale presente nella miscela (0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%). Tali tenori sono stati calcolati sul volume degli aggregati.

Nella fase di prequalifica, considerando tutte le combinazioni tra i diversi componenti e le due tipologie di polverino di gomma, sono stati realizzati complessivamente 44 tipi di miscele di cui: 4 senza aggiunta di polverino di gomma, 20 con polverino tradizionale (TCR) e 20 con polverino criogenico (CCR). Nelle righe

seguenti si schematizzano le diverse combinazioni.

- Cemento¹ 1.5%; Emulsione¹ 3.5%; Polverino² 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%;
- Cemento¹ 1.5%; Emulsione¹ 5.0%; Polverino² 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%;
- Cemento¹ 3.0%; Emulsione¹ 3.5%; Polverino² 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%;
- Cemento¹ 3.0%; Emulsione¹ 5.0%; Polverino² 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%.

Nella fase di caratterizzazione meccanica, sulla base dei risultati e delle considerazioni derivate da quella di prequalifica, sono state realizzate complessivamente 12 tipi di miscele di cui: 4 senza aggiunta di polverino di gomma, 4 con polverino tradizionale (TCR) e 4 con polverino criogenico (CCR). In tale analisi, infatti, per il polverino si è considerata un'unica percentuale del 3%. Segue lo schema delle varie combinazioni:

- Cemento¹ 1.5%; Emulsione¹ 3.5%; Polverino² 0%, 3%;
- Cemento¹ 1.5%; Emulsione¹ 5.0%; Polverino² 0%, 3%;
- Cemento¹ 3.0%; Emulsione¹ 3.5%; Polverino² 0%, 3%;
- Cemento¹ 3.0%; Emulsione¹ 5.0%; Polverino² 0%, 3%.

Le percentuali relative ai leganti a base cementizia e bituminosa sono espresse con riferimento alla massa degli aggregati, mentre il tenore del polverino è calcolato sul volume di quest'ultimi; ciò tiene conto della notevole differenza di densità tra l'aggregato sostituito e il polverino stesso. Tale aspetto è illustrato più dettagliatamente nel paragrafo seguente.

¹ Percentuale calcolata sulla massa degli aggregati.

² Percentuale calcolata sul volume degli aggregati.

4.2.2 MATERIALI

Di seguito si descrivono i componenti utilizzati, le loro proprietà fisiche, chimiche e geometriche ed i quantitativi operativi per la realizzazione delle miscele.

4.2.2.1 Fresato (RA)

L'aggregato utilizzato in questa sperimentazione per ai fini della realizzazione delle miscele stabilizzate ad emulsione e cemento è costituito interamente da fresato o *Reclaimed Asphalt* (100% RA); ossia si tratta di materiale completamente proveniente da scarifica di pavimentazioni in conglomerato bituminoso e opportunamente trattato e stoccato in impianto, secondo quanto previsto dalle normative vigenti. La distribuzione granulometrica degli aggregati è stata valutata vagliando gli stessi in appositi setacci, in conformità alla normativa EN 933-1.

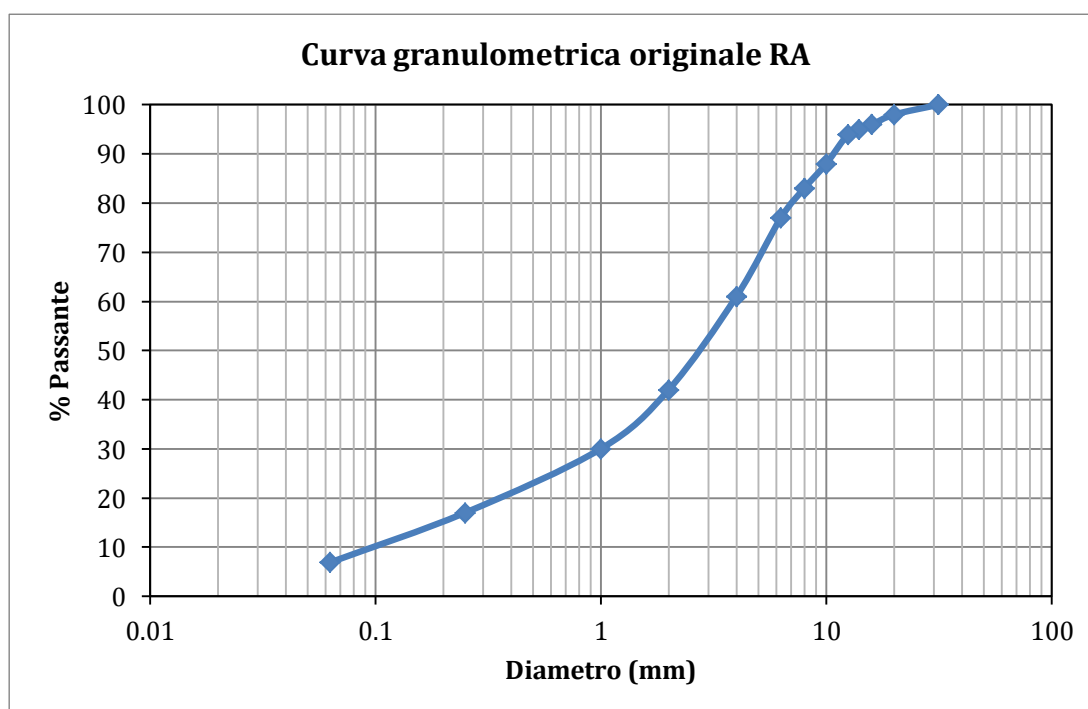


Figura 4.5: Curva granulometria fresato (RA).

In Figura 4.5 e Tabella 4.2 sono riportate la curva e la composizione granulometrica del fresato.

APERTURA SETACCI (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 4.2: Composizione granulometrica fresato (RA).

Dai dati si evidenzia che la dimensione massima degli aggregati non supera i 30 mm circa, conformemente alle indicazioni tecniche riguardo ai limiti dimensionali degli aggregati utilizzabili per il confezionamento a freddo di conglomerati bituminosi. Si noti, inoltre, un quantitativo importante (6.9%) di frazione fine passante a 0.063 mm.

Il fresato è stato sottoposto anche a prove di estrazione del bitume invecchiato residuo di cui sono ricoperte le sue particelle, con particolare attenzione alle caratteristiche di penetrazione e del grado di ossidazione. I test hanno evidenziato la presenza di un bitume residuo molto duro con un grado di penetrazione leggermente

inferiore a 10 dmm.

Per conseguire un elevato grado di addensamento delle miscele, ai fini dell'ottenimento di elevate caratteristiche meccaniche e di un conseguente incremento della vita utile dell'infrastruttura viaria, è necessario affinare la curva originale del RA in modo che sia ben assortita, cioè composta da sensibili percentuali di materiale per ogni tipo di pezzatura (Figura 4.6).

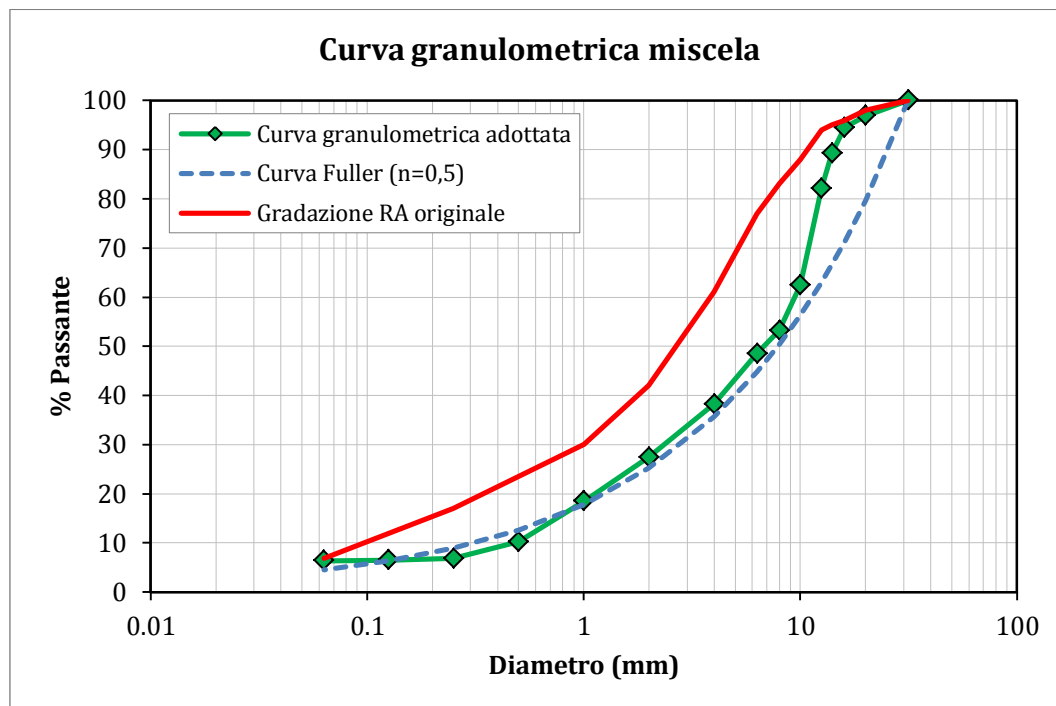


Figura 4.6: Curva fresato, massimo addensamento (Fuller) e miscela.

Tra le diverse relazioni presenti in letteratura, le quali permettono di determinare la curva di massimo addensamento, si è adottata quella di Fuller:

$$P = \left[\frac{d}{D} \right]^n \cdot 100 \quad (4.1)$$

dove

P = percentuale, sulla massa, del passante al setaccio d (mm);

d = apertura setaccio considerato;

D = massima dimensione delle particelle;

n = coefficiente di gradazione dipendente dalle caratteristiche di addensamento del materiale; si adotta $n = 0.5$.

Facendo riferimento alla curva di massimo addensamento, gli aggregati sono stati sottoposti ad accurata setacciatura in laboratorio e sono stati suddivisi nelle tre seguenti classi dimensionali:



Figura 4.7: Tre classi di fresato.

- RA 10-10+;
- RA 5-10;
- RA 0-5.

In Figura 4.8 è riportata la granulometria complessiva degli aggregati, costituita dalle 3 classi di RA.

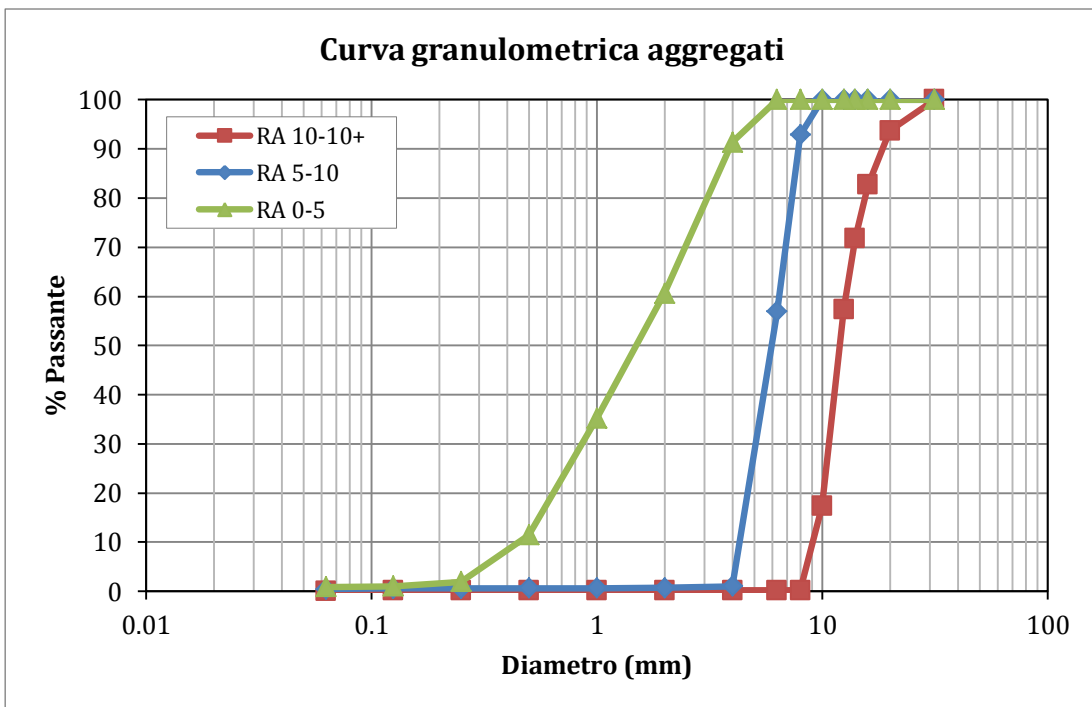


Figura 4.8: Granulometria delle tre classi di RA.

4.2.2.2 Polverino di gomma (CR)

Come già anticipato, il polverino di gomma utilizzato nella sperimentazione è di due tipologie diverse, in funzione del tipo di granulazione effettuata:

- tradizionale *Traditional Crumb Rubber* (TCR);
- criogenica *Criogenic Crumb Rubber* (CCR).

L'analisi al microscopio elettronico effettuata presso il Centro Ceramico di Bologna ha evidenziato che le particelle di gomma criogeniche CCR hanno una dimensione inferiore se confrontate con quelle tradizionali TCR; in aggiunta, queste ultime presentano una superficie meno uniforme e regolare dovuta al tipo di lavorazione subita. Le immagini sono riportate dalla Figura 4.9 alla Figura 4.12 in funzione dell'ingrandimento utilizzato e della tipologia di materiale.

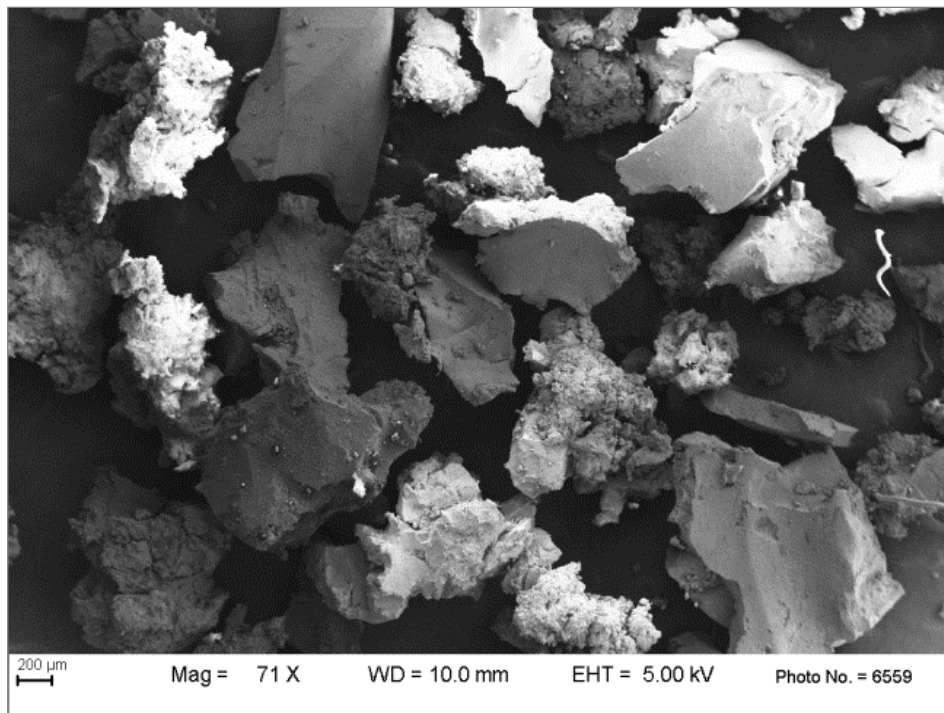


Figura 4.9: Polverino di gomma TCR al microscopio elettronico (ingrandimento 71X).

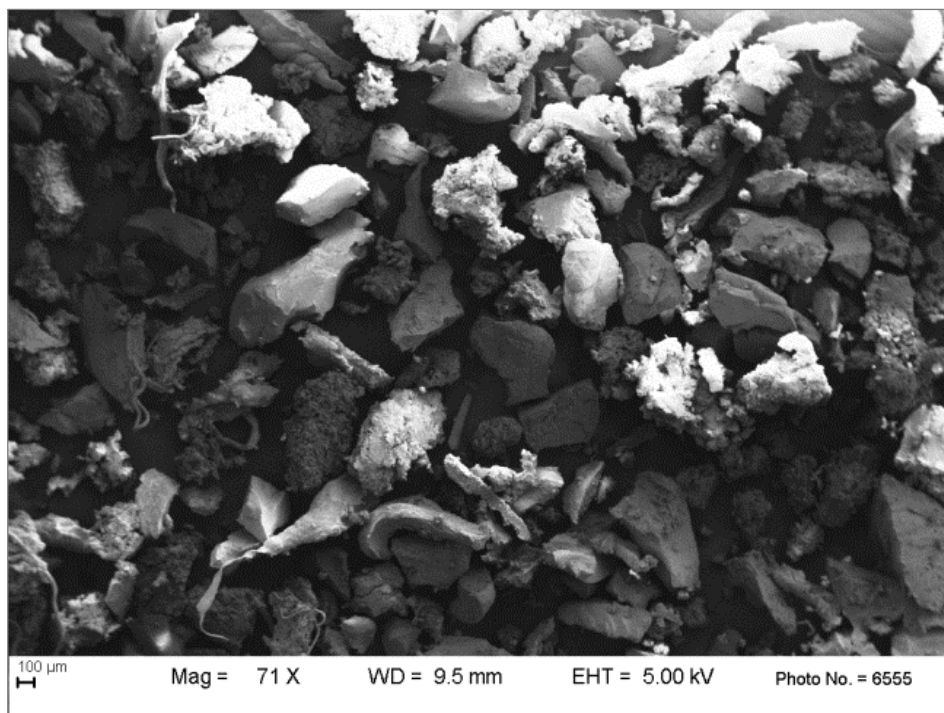


Figura 4.10: Polverino di gomma CCR al microscopio elettronico (ingrandimento 71X).

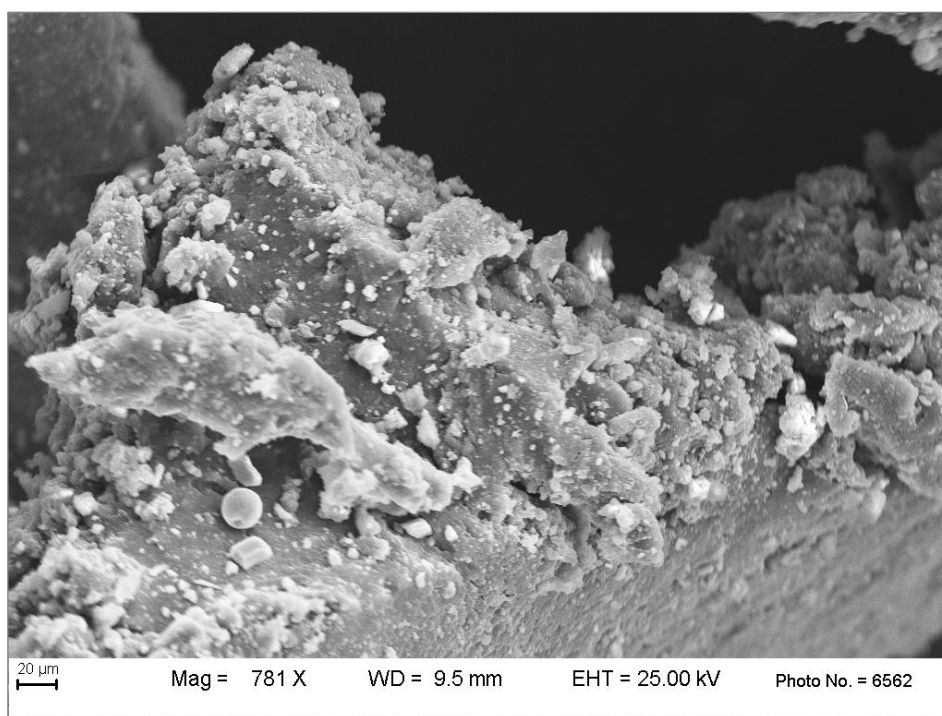


Figura 4.11: Polverino di gomma TCR al microscopio elettronico (ingrandimento 781X).

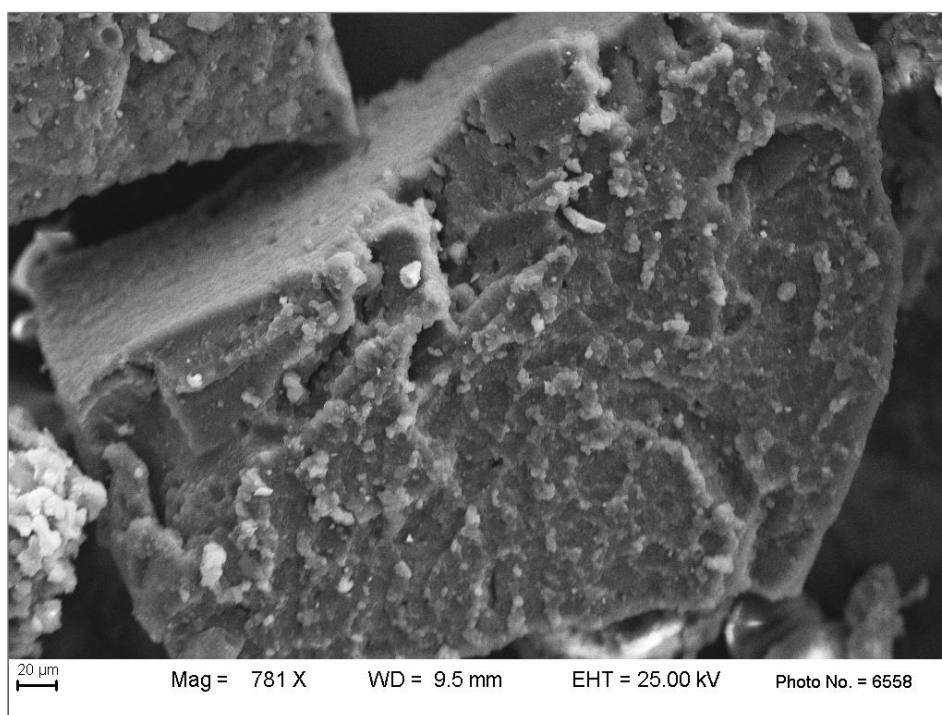


Figura 4.12: Polverino di gomma CCR al microscopio elettronico (ingrandimento 781X).

Le caratteristiche granulometriche del polverino tradizionale TCR sono riportate in Figura 4.13 e Tabella 4.3.

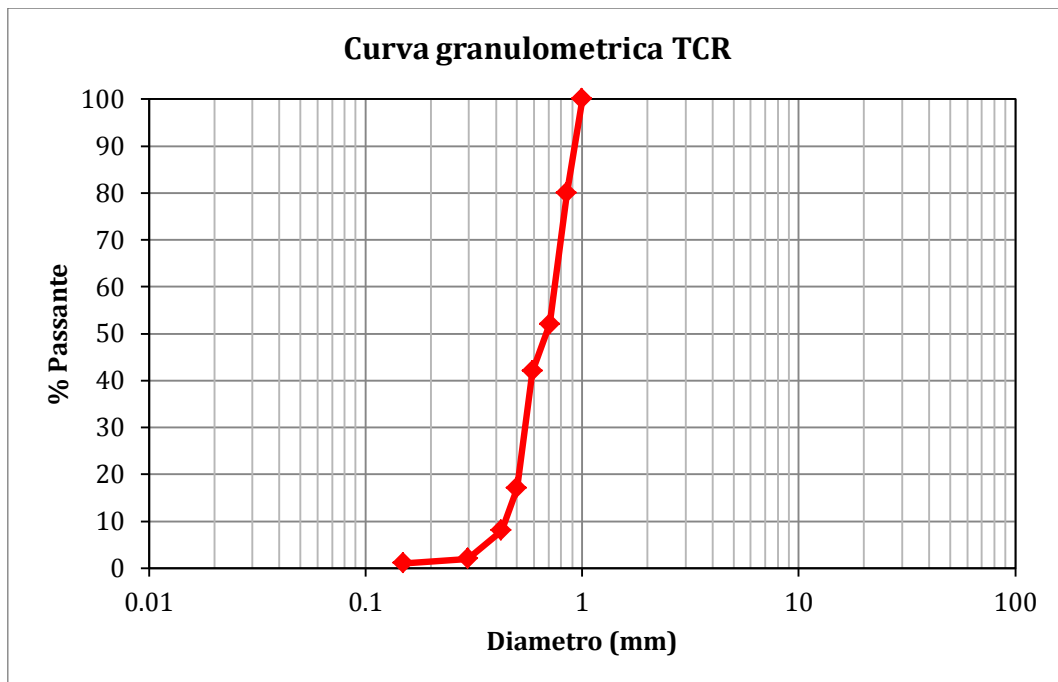


Figura 4.13: Curva granulometrica polverino tradizionale (TCR).

SERIE	SETACCI			TRATTENUTO	PASSANTE
	MESH	μm	mm	%	%
-	-	1000	1.000	0	100
ISO	20	850	0.850	20	80
ASTM	25	710	0.710	28	52
ASTM	30	590	0.590	10	42
ASTM	35	500	0.500	25	17
ASTM	40	425	0.425	9	8
ASTM	50	297	0.297	6	2
ASTM	100	149	0.149	1	1
-	< 100	< 149	< 0.149	1	0

Tabella 4.3: Granulometria polverino tradizionale (TCR).

Le caratteristiche granulometriche del polverino criogenico CCR sono invece riportate in Figura 4.14 e Tabella 4.4.

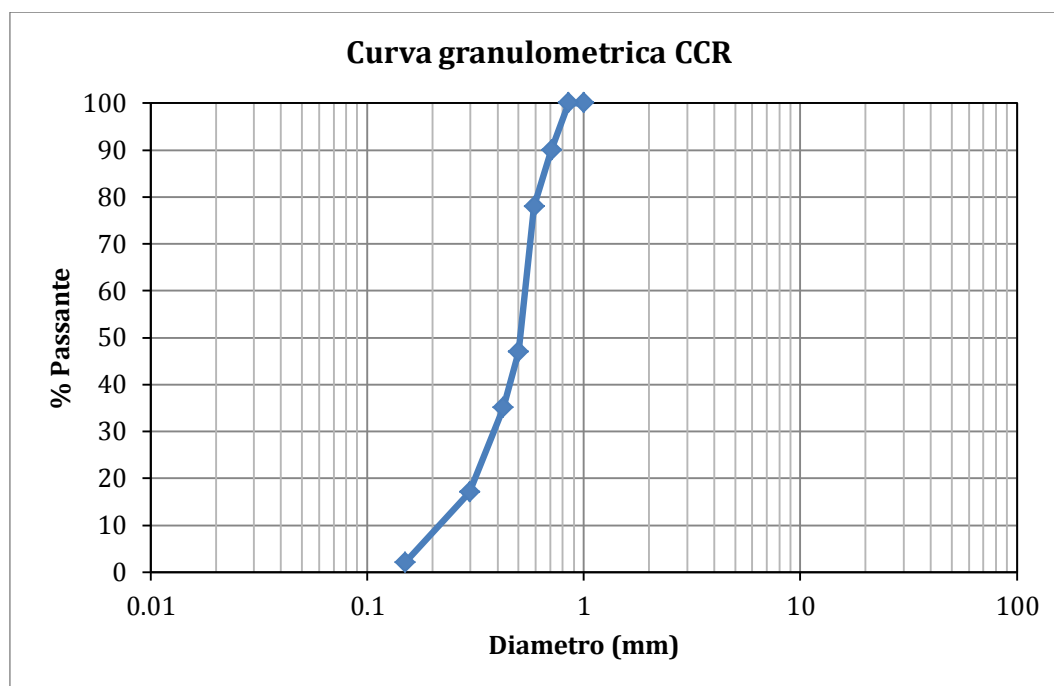


Figura 4.14: Granulometria polverino criogenico.

SETACCI				TRATTENUTO	PASSANTE
SERIE	MESH	μm	mm	%	%
-	-	1000	1.000	0	100
ISO	20	850	0.850	0	100
ASTM	25	710	0.710	10	90
ASTM	30	590	0.590	12	78
ASTM	35	500	0.500	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 4.4: Granulometria polverino criogenico (CCR).

Dal confronto delle curve granulometriche dei due tipi di polverino di gomma, evidenziato in Figura 4.15, si conferma che quello criogenico è costituito da una percentuale di granulometria più fine maggiore rispetto a quello tradizionale; le percentuali di passante a 0.5 mm sono rispettivamente 47% e 17%.

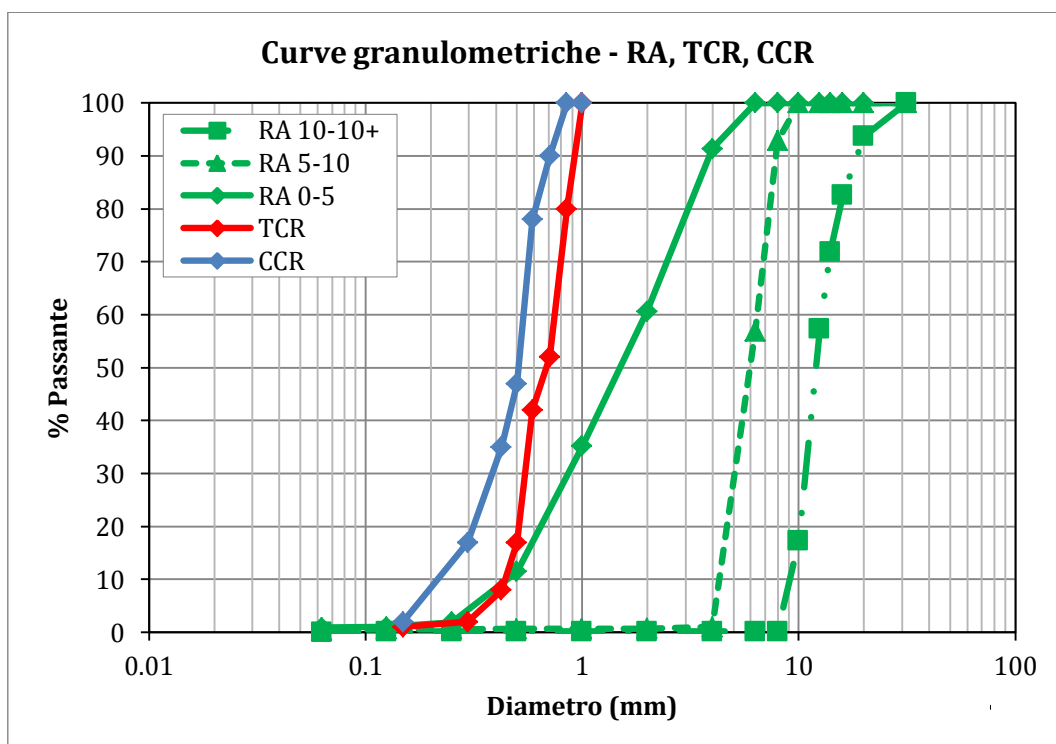


Figura 4.15: Confronto granulometria fresato, polverino tradizionale e criogenico.

Il polverino di gomma è stato utilizzato per sostituire in volume parte della frazione fine del fresato (RA 0-5). Dalla miscela di progetto del RA sono state sottratte quantità variabili della frazione fine RA 0-5, calcolate come percentuale rispetto alla massa degli aggregati ed in seguito sostituite con il polverino, a parità di volume occupato (Figura 4.16 e Figura 4.17). La motivazione di tale scelta è dovuta alla differenza di densità tra i due materiali e alla volontà di mantenere inalterate le caratteristiche volumetriche complessive delle miscele.

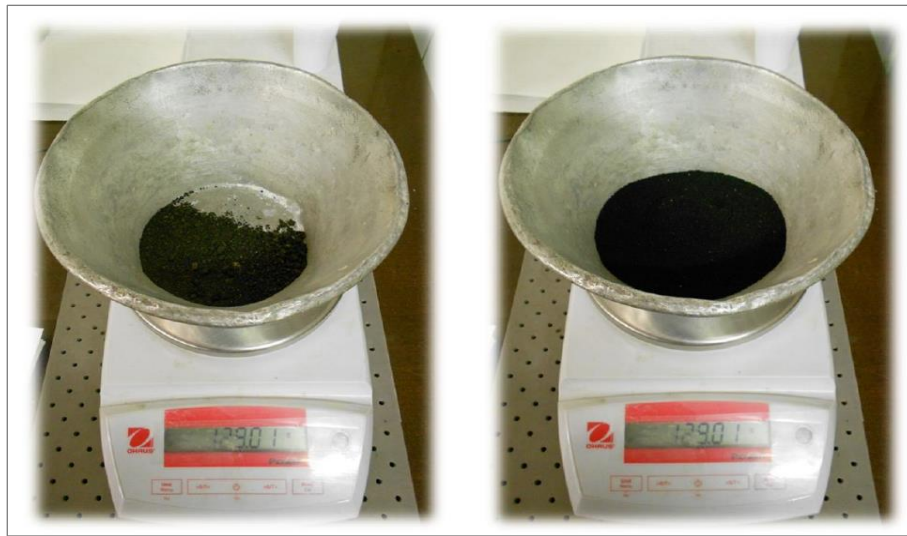


Figura 4.16: Confronto tra volume fresato fine (sinistra) e polverino (destra), a parità di massa.



Figura 4.17: Esempio quantità di polverino contenuta nei provini (3%).

Il computo delle quantità di polverino da introdurre nella miscela è stato eseguito sulla base del rapporto tra la massa volumica reale del fresato e quella del polverino. La massa volumica dei materiali è stata determinata in laboratorio mediante metodo picnometrico ed i valori ottenuti sono riportati di seguito:

- RA: 2.530 g/cm³;
- TCR: 1.120 g/cm³;

- CCR: 1.080 g/cm³.

Il rapporto tra le masse volumiche rispetto al fresato risulta quindi essere equivalente a 2.259 per il polverino tradizionale e a 2.343 per quello criogenico.

4.2.2.3 Emulsione bituminosa (EM)

L'emulsione bituminosa utilizzata nelle miscele è la commerciale RIGIVAL CM SBS ed è stata fornita dalla VALLI ZABBAN S.p.A., società impegnata nella produzione di leganti bituminosi ad uso stradale. Il bitume di base è modificato con polimeri SBS (Stirene-Butadiene-Stirene) in emulsione cationica, sovrastabilizzata, specifica per la realizzazione di conglomerati bituminosi a freddo contenenti cemento Portland 325 e/o calce idrata (Tabella 4.5).

CARATTERISTICHE EMULSIONE BITUMINOSA	Normativa	Unità	Valori
Viscosità a 40°C (tempo di efflusso tazza 2 mm)	EN 12846	sec	40
Effetto dell'acqua sull'adesione	EN 13614	%	95
Indice di rottura (metodo del filler minerale)	EN 13075-1	%	210
Stabilità alla miscelazione con cemento	EN 12848	%	< 2.0
CARATTERISTICHE LEGANTE	Normativa	Unità	Valori
Penetrazione a 25°C Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio	EN 1426	dmm	55
Punto di Rammollimento Consistenza alle temperature elevate di esercizio	EN 1427	°C	62
Coesione Force Ductility Test a 5°C	EN 13703	J/cm ²	6.5
* Legante recuperato tramite evaporazione (EN 13074)			

Tabella 4.5: Caratteristiche dell'emulsione bituminosa e del bitume contenuto.

4.2.2.1 Cemento (C) e filler

Per tutte le miscele è stato impiegato cemento Portland pozzolanico con classe di resistenza 32.5 N/mm² ed inerte calcareo di cava come filler.

La quantità complessiva di filler aggiunto (cemento e filler calcareo), prescindendo dalla sua origine e dalla sua attività/inattività, è stata mantenuta sempre costante e ad un tenore complessivo del 3%. Ne consegue che per le miscele contenenti già di partenza una percentuale di solo cemento uguale al 3%, non è stato aggiunto anche filler calcareo, mentre per le miscele contenenti cemento in tenore del 1.5% si è adottato un tenore di filler di 1.5%.

4.2.2.2 Acqua

Nella presente sperimentazione la definizione della fase liquida ottimale è stata scelta sulla scorta di numerose esperienze e ricerche di laboratorio e in accordo con la consolidata pratica tecnica di settore. In particolare si è adoperata una fase liquida totale compresa tra il 5.5% e il 6%, tenuto conto del tenore di legante della miscela ed operando le correzioni necessarie tramite l'aggiunta di piccole quantità di acqua agli aggregati. Naturalmente, nelle miscele con maggiore tenore di emulsione bituminosa è stata aggiunta una percentuale di acqua minore rispetto a quelle meno ricche di emulsione, al fine di rendere l'impasto lavorabile ed evitando problemi di addensabilità e compattazione, che possono essere provocati dalla presenza di acqua in seguito alla rottura dell'emulsione.

L'acqua impiegata è esente da impurità dannose, oli, acidi, alcali, materia organica e qualsiasi altra sostanza nociva.

CAPITOLO 5:

ANALISI DI PREQUALIFICA

5.1 CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI

La realizzazione dei provini di riciclato a freddo con emulsione bituminosa, cemento e polverino di gomma è stata eseguita presso il Laboratorio di Strade LAS del Dipartimento DICAM (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali), Facoltà di Ingegneria dell'Università Alma Mater Studiorum di Bologna. Durante le diverse fasi di miscelazione, preparazione e compattazione, si è cercato di riprodurre il più fedelmente possibile il processo lavorativo utilizzato in sito.

5.1.1 MISCELAZIONE

Per la Fase 2 di prequalifica, così come descritto nel paragrafo 4.2.1, sono stati realizzati un totale di 132 provini cilindrici, suddivisi in miscele senza polverino CR0%, con polverino di gomma tradizionale TCR e con quello criogenico CCR. La Tabella 5.1 riassume schematicamente il totale dei campioni per l'analisi di

prequalifica, suddivisi nelle diverse tipologie di miscele.

CEMENTO %	EMULSIONE %	CR0% %	N° Provini	TCR %	N° Provini	CCR %	N° Provini
1.5	3.5	0	3				
				1	3	1	3
				2	3	2	3
				3	3	3	3
				4	3	4	3
				5	3	5	3
1.5	5.0	0	3				
				1	3	1	3
				2	3	2	3
				3	3	3	3
				4	3	4	3
				5	3	5	3
3.0	3.5	0	3				
				1	3	1	3
				2	3	2	3
				3	3	3	3
				4	3	4	3
				5	3	5	3
3.0	5.0	0	3				
				1	3	1	3
				2	3	2	3
				3	3	3	3
				4	3	4	3
				5	3	5	3
		CR0%	12	TCR	60	CCR	60

Tabella 5.1: Numero provini per l'analisi di prequalifica.

Per ciascun provino è stata calcolata una massa complessiva di materiale di target pari a 4.5 kg. In relazione, quindi, alla massa complessiva e alle percentuali di tutti gli elementi della miscela (Tabella 5.2) sono state determinate le quantità in massa di fresato, polverino di gomma, cemento, filler, emulsione bituminosa e acqua.

MATERIAL	1.5C_3.5EM	1.5C_5.0EM	3.0C_3.5EM	3.0C_5.0EM
RA 10-10+	49.0%	49.0%	49.0%	49.0%
RA 5-10	13.0%	13.0%	13.0%	13.0%
RA 0-5	35.0-CR%	35.0-CR%	35.0-CR%	35.0-CR%
Polverino di gomma (CR)⁽¹⁾	CR%	CR%	CR%	CR%
Cemento (C)	1.5%	1.5%	3.0%	3.0%
Filler	1.5%	1.5%	0.0%	0.0%
Emulsione bituminosa (EM)	3.5%	5.0%	3.5%	5.0%
Acqua addizionale	2.2%	0.7%	2.2%	0.7%

Tabella 5.2: Composizione percentuale della miscela.

In funzione del rapporto tra le masse volumiche del polverino di gomma rispetto al fresato (paragrafo 4.2.2.2) e del tenore di polverino caratteristico della miscela, le quantità di materiale RA 0-5 prelevato e di polverino introdotto in sostituzione sono riportate nella Tabella 5.3.

% RA SOSTITUITO DA CR	0%	1%	2%	3%	4%	5%
RA - Massa sottratta (g)	0	43	86	129	172	215
TCR - Massa aggiunta (g)	0.00	19.04	38.07	57.11	76.14	95.18
CCR - Massa aggiunta (g)	0.00	18.35	36.71	55.06	73.41	91.76

Tabella 5.3: Quantità di RA sottratto e quantità di CR aggiunto alla miscela di progetto.

Nella fase successiva è stata effettuata la miscelazione di tutti gli elementi, operazione di fondamentale importanza per la realizzazione di un impasto il più omogeneo possibile. Tale lavorazione si è svolta seguendo una procedura prestabilita e definita dai seguenti passi:

1. dosaggio e collocazione in una teglia delle varie pezzature del fresato, nel rispetto della curva granulometrica di progetto;
2. contemporanea realizzazione di uno “*slurry*”, tramite impasto del cemento e dell’acqua;
3. aggiunta dell’acqua di correzione, necessaria al raggiungimento dell’umidità ottima, al fresato presente nella teglia e successiva miscelazione;
4. miscelazione dello “*slurry*” cementizio con l’emulsione bituminosa;
5. aggiunta dei leganti al fresato (Figura 5.1, centro) e miscelazione fino a completa ed uniforme dispersione della fase liquida (Figura 5.1, destra);
6. inserimento del conglomerato nella fustella di compattazione (Figura 5.2, sinistra);
7. compattazione del conglomerato (Figura 5.2, destra).

Talvolta è stato necessario limitare la quantità di cemento impiegata nello “*slurry*” che sarebbe risultato altrimenti troppo denso e pastoso per consentire un’adeguata miscelazione; in tal caso la frazione residua di cemento è stata unita direttamente agli aggregati prima dell’aggiunta dei leganti. Anche per il filler, quando previsto, è sempre stato quest’ultimo procedimento (Figura 5.1, sinistra).

L’inserimento del polverino di gomma nella miscela è avvenuto per mezzo di un passaggio intermedio: il componente è stato aggiunto allo “*slurry*” di cemento ed acqua (punto 2) per poi essere miscelato con l’emulsione bituminosa solo

successivamente, rimanendo invariati gli altri passaggi. Tale scelta è scaturita dalla tendenza al galleggiamento del polverino che, se inserito direttamente nell'emulsione produrrebbe una miscela non uniforme ed omogenea.



Figura 5.1: Aggiunta filler (sinistra), aggiunta leganti (centro), miscelazione (destra).



Figura 5.2: Inserimento del conglomerato nella fustella (sinistra), compattazione (destra).

5.1.1.1 Denominazione dei provini

L'identificazione di ciascun provino è stata affidata ad una sigla alfanumerica, del tipo "03FA_0R_3.0C_5.0E" (Figura 5.3), che consente di sintetizzarne le caratteristiche: numero provino, serie provino, percentuale di polverino di gomma, cemento ed emulsione bituminosa.



Figura 5.3: Nome identificativo del provino.

Di seguito si descrivono le sigle identificative:

- **N° provino**: il confezionamento dei provini è avvenuto per serie, ognuna delle quali costituita da un massimo di 18 provini, che tale indicatore permette di distinguere nella singola serie.
- **Serie Provino**: la sigla è composta da due lettere e consente di identificare la serie di riferimento durante le lavorazioni e le analisi.
- **% CR**: 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 contenuta nel campione.

5.1.2 COMPATTAZIONE

5.1.2.1 Compattatore giratorio

I compattatori giratori sono apparecchiature in grado di produrre in laboratorio provini cilindrici di conglomerato bituminoso aventi caratteristiche di addensamento e distribuzione interna dei granuli di aggregato molto simili a quelle ottenute in sito.



Figura 5.4: Compattatore giratorio Pine Instrument in dotazione al Laboratorio LAS.

Il principio di funzionamento prevede che il conglomerato bituminoso, inserito all'interno della fustella di compattazione, sia sottoposto ad una pressione di addensamento verticale uniforme, la cui risultante ha una direzione di applicazione inclinata rispetto all'asse della fustella, essendo anche quest'ultima inclinata di un angolo prefissato rispetto alla verticale. Durante il processo di compattazione il meccanismo di rivoluzione caratteristico della macchina distribuisce l'inclinazione della fustella uniformemente attorno al proprio asse, ad una velocità costante prefissata (Figura 5.5).

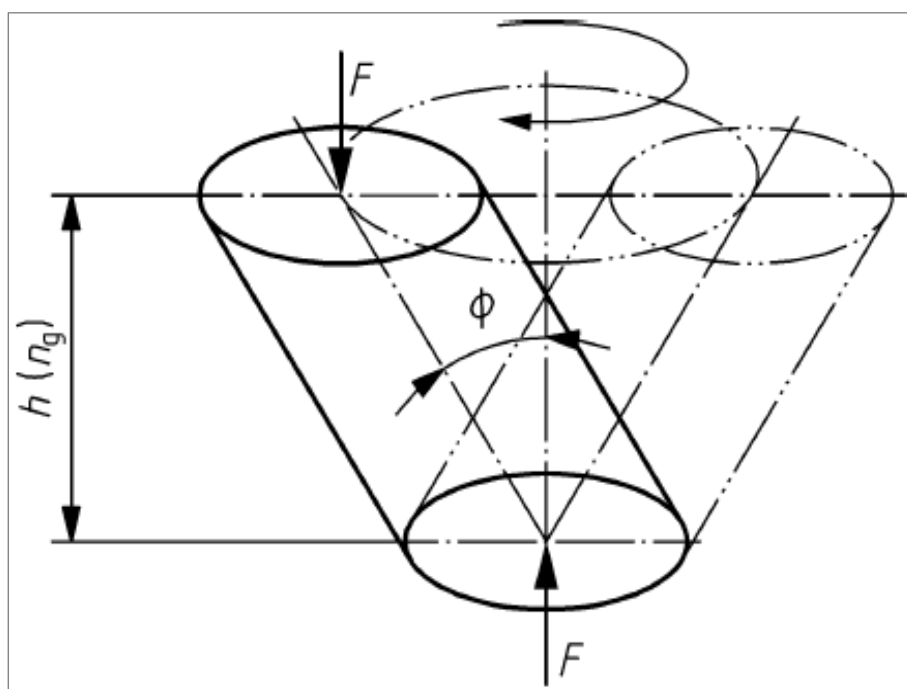


Figura 5.5: Schema di applicazione del carico durante la compattazione giratoria.

L'azione complessiva esercitata sul materiale è quindi la somma di una compressione verticale e di una sollecitazione di taglio, tali da generare un effetto impastante e una continua riorganizzazione della matrice litica con addensamento progressivo.

Lo stato tensionale indotto simula più verosimilmente le sollecitazioni a cui è sottoposto il materiale durante la compattazione dei rulli in sito e consente il confezionamento di provini con un grado di addensamento e una disposizione dei granuli simili a quanto realmente riscontrabile sul campo. Mediante l'impiego di tecniche di compattazione impulsive, quali ad esempio la metodologia Marshall, viene indotto un progressivo avvicinamento dei granuli che si interrompe all'atto della formazione di zone di saldo contatto. La compattazione girettoria 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 5.6).

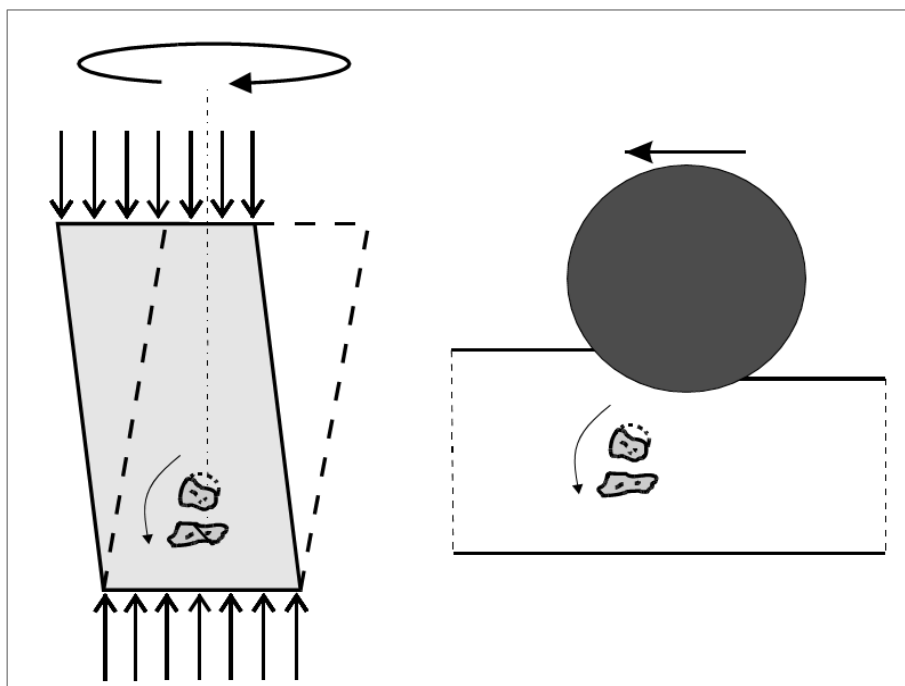


Figura 5.6: Comparazione tra compattazione girettoria e addensamento in sito.

Il compattatore girettorio impiegato nella sperimentazione è prodotto dalla Pine Instrument Company e presenta caratteristiche conformi alle prescrizioni tecniche

delle norme americane SHRP¹ per ciò che riguarda la pressione verticale, l'angolo d'inclinazione della fustella e la velocità di rotazione. La Figura 5.7 (sinistra) illustra gli elementi meccanici principali, responsabili della compattazione. In essa si possono distinguere il pistone di carico superiore e la piastra di appoggio della pressa, evidenziati in verde, insieme al meccanismo di rotazione costituito dai tre bracci indicati in rosso, solidali alla corona di base rotante: due di essi presentano cuscinetti eccentrici fissi in posizione ed il terzo cuscinetti su un meccanismo che scorrendo verticalmente è responsabile dell'inclinazione della fustella secondo l'angolo prefissato.

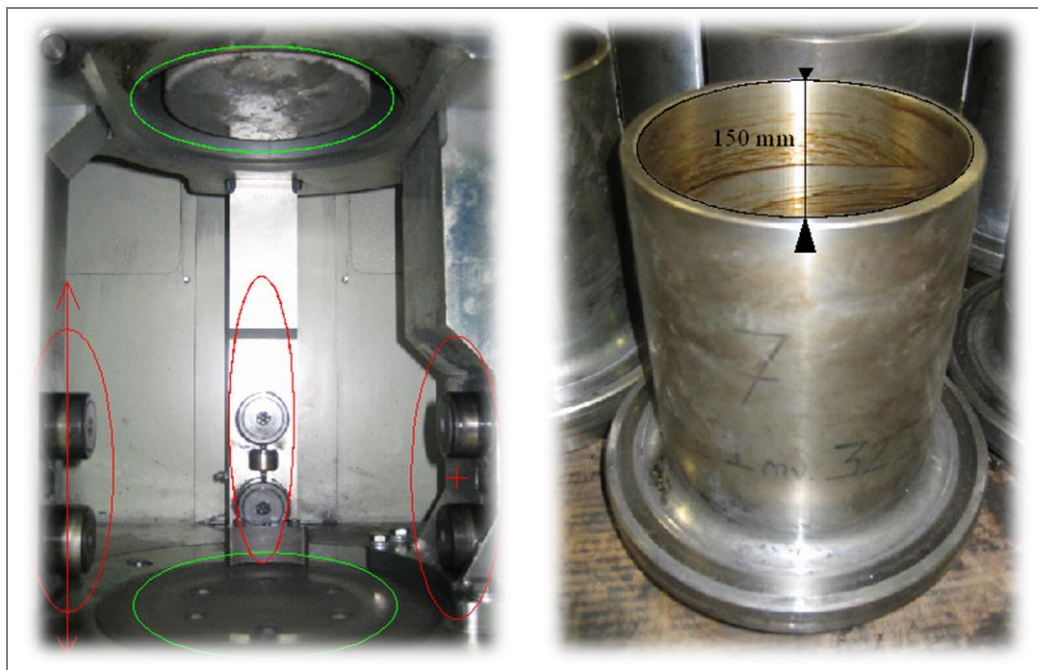


Figura 5.7: Componenti principali del compattatore giratorio (sinistra) e fustella (destra).

¹ Il progetto *Strategic Highway Research Program (SHRP)* fu sviluppato in America negli anni '90. Il progetto ha portato alla definizione di nuove apparecchiature, di protocolli di prova e di criteri di selezione dei materiali e delle miscele stradali basati sulle loro prestazioni attese in opera. In questo ambito si inseriscono il nuovo metodo di progettazione volumetrico delle miscele (*Superior Performing Pavement*) e la tecnica di compattazione giratoria. I parametri caratteristici proposti all'interno del progetto *SHRP* per il compattatore giratorio sono: pressione verticale 600 kPa, angolo esterno d'inclinazione 1,25°, velocità di rotazione 30 rpm.

La fustella di compattazione (Figura 5.7 destra) presenta una pista di rotolamento tramite la quale i cuscinetti imprimono l'inclinazione allo stampo ed è completata da una piastra inferiore e una superiore flottanti. Il diametro, gli spessori, le durezza e tutte le altre proprietà sono specificate dalla normativa.

Nella Tabella 5.4 sono riportate le principali caratteristiche tecniche del compattatore in esame.

CARATTERISTICA	INTERVALLO VALORI
Pressione verticale	200/1000 kPa \pm 18 kPa
Angolo d'inclinazione	0.50/2.00° \pm 0.02°
Velocità di rotazione	30 \pm 0.5 giri/min
Massimo numero di giri	1-999
Diametro e altezza fustelle	100 mm x 200 (h) mm / 150 mm x 250 (h) mm
Metodo operativo	Controllo numeri di giri / Controllo altezza del provino

Tabella 5.4: Specifiche tecniche del compattatore giratorio.

In ambito europeo le prescrizioni da seguire per un corretto confezionamento dei provini e per la loro compattazione sono riportate nei due seguenti riferimenti normativi:

- *EN 12697-10*: Miscele bituminose. Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo. Parte 10: Compattabilità.
- *EN 12697-31*: Miscele bituminose. Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo. Parte 31: Preparazione del provino con pressa giratoria.

In ambito nazionale i capitolati e i riferimenti tecnici richiamano il più delle volte i parametri caratteristici proposti all'interno del progetto americano SHRP.

5.1.2.2 Parametri di prova

I parametri di prova utilizzati in questo progetto di ricerca per il confezionamento di tutti i provini tramite compattatore giratorio sono riportati di seguito (Tabella 5.4).

PARAMETRO	VALORE PROVA
Pressione verticale	600 kPa
Angolo d'inclinazione	1.25°
Velocità di rotazione	30 giri/min
Numero di giri	180
Diametro fustella	150 mm
Metodo operativo	Controllo numeri di giri

Tabella 5.5: Parametri di prova per compattazione.

Come previsto dalla pratica tecnica e dai riferimenti normativi nazionali, le prove sono state eseguite con il controllo del numero dei giri e sono state terminate al raggiungimento della 180-esima rivoluzione. Durante l'esecuzione della compattazione il software di gestione ha registrato l'altezza del provino ad ogni ciclo. In Tabella 5.6 sono riportati a titolo di esempio i dati di prova di alcuni campioni, filtrati ogni 5 giri.

Per tutti i provini l'andamento della curva (Figura 5.8), che riporta in ascissa il numero dei giri e in ordinata l'altezza del provino, è quello tipico della compattazione; esso presenta un maggiore decremento nei primi giri, quando la miscela è ancora sciolta e un comportamento asintotico rispetto al valore finale caratteristico. Nella fase conclusiva l'altezza finale caratteristica di ciascun provino è quella corrispondente al 180-esimo giro.

N. Giro	10N_3R_3.0C_3.5E	11N_3R_3.0C_3.5E	12N_3R_3.0C_3.5E
0	135.6	134.8	136.3
5	128.6	127.8	129.2
10	125.2	124.5	125.9
15	123.1	122.4	123.8
20	121.6	120.8	122.3
25	120.4	119.6	121.1
30	119.4	118.6	120.2
35	118.6	117.8	119.4
40	117.9	117.1	118.7
45	117.4	116.5	118.1
50	116.9	116.0	117.6
55	116.4	115.5	117.1
60	116.0	115.1	116.7
65	115.7	114.7	116.3
70	115.3	114.4	115.9
75	115.0	114.1	115.6
80	114.8	113.8	115.3
85	114.5	113.5	115.0
90	114.3	113.2	114.8
95	114.0	113.0	114.5
100	113.8	112.8	114.3
105	113.6	112.6	114.1
110	113.5	112.4	113.9
115	113.3	112.2	113.7
120	113.1	112.0	113.5
125	113.0	111.8	113.3
130	112.8	111.7	113.2
135	112.7	111.5	113.0
140	112.5	111.4	112.8
145	112.4	111.2	112.7
150	112.2	111.1	112.6
155	112.1	111.0	112.4
160	112.0	110.8	112.3
165	111.9	110.7	112.2
170	111.8	110.6	112.0
175	111.6	110.5	111.9
180	111.4	110.3	111.7

Tabella 5.6: Esempio dati di prova, registrazione altezza in relazione al numero di giri.

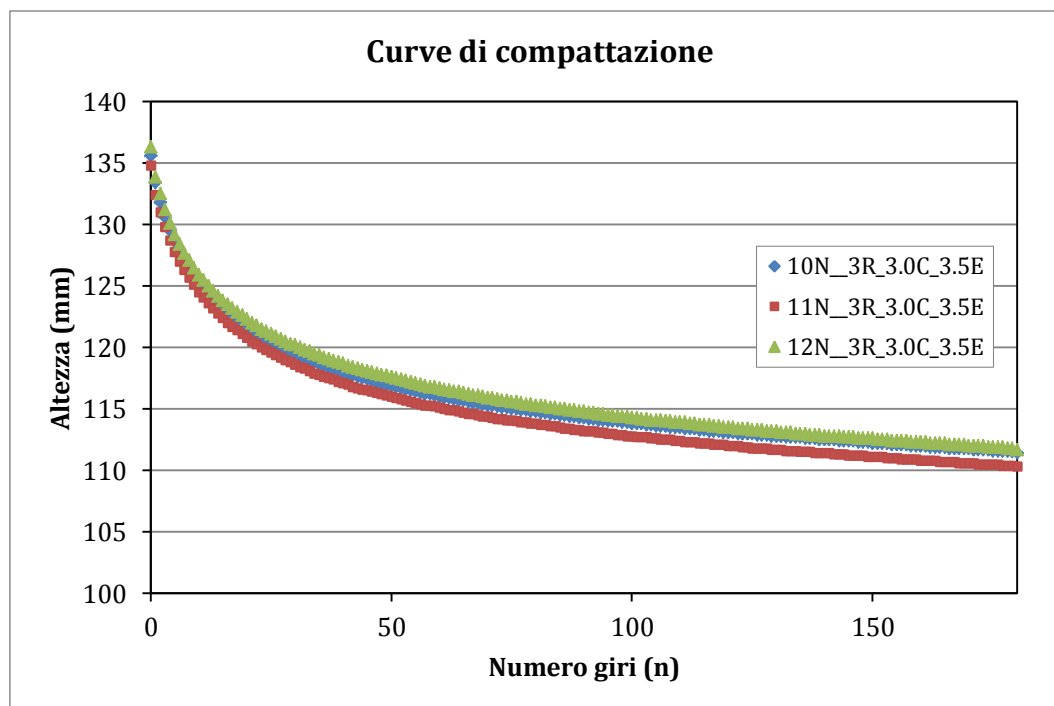


Figura 5.8: Altezza del provino con l'aumentare del numero dei giri.

5.1.3 MATURAZIONE

Al termine della procedura di compattazione tutti i campioni sono stati fatti maturare secondo la seguente modalità:

- inserimento del provino in una busta ermetica, al fine di mantenere costante l'umidità (Figura 5.9);
- 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C;
- rimozione del provino dalla busta ermetica;
- ulteriori 3 giorni di maturazione in stufa a 40°C;
- estrazione del provino dalla stufa;
- completamento della maturazione a 20 °C fino alla stabilizzazione della massa.



Figura 5.9: Inserimento dei provini in busta ermetica.

Completata la maturazione, i provini sono stati sottoposti alle fasi successive di analisi, come previsto dal programma di ricerca.

5.2 ANALISI DELLE PROPRIETÀ VOLUMETRICHE

5.2.1 CURVE DI ADDENSAMENTO

Nella letteratura tecnica legata all'utilizzo del compattatore giratorio, viene data grande importanza sia allo stato di addensamento finale raggiunto dal conglomerato bituminoso al termine della compattazione, sia alle modalità con le quale tale limite viene raggiunto. Tramite l'analisi di tale andamento è possibile valutare le proprietà volumetriche caratteristiche della miscela durante tutto il processo di compattazione e trarne importanti informazioni. Il grafico che riporta tali informazioni è denominato

curva di addensamento (Figura 5.10) e presenta in ascissa il numero di giri di compattazione, in scala logaritmica, ed in ordinata l'addensamento percentuale della miscela $\rho_n(\%)$ ad ogni giro n . Tale grandezza è determinata valutando la densità del campione rispetto alla densità massima teorica ρ_m della miscela (0% di vuoti), calcolata in conformità alla norma EN 12697-05.

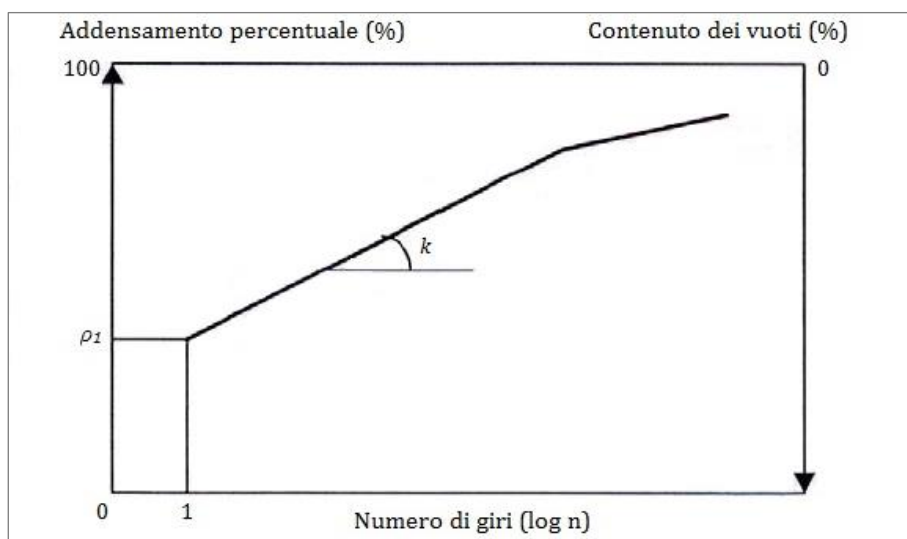


Figura 5.10: Esempio di curva di addensamento.

La relazione analitica che lega i parametri di compattazione è la seguente:

$$\rho_n(\%) = k \log n + \rho_1(\%) \quad (5.1)$$

dove

$\rho_n(\%)$ = addensamento percentuale.

k = pendenza della curva di addensamento (lavorabilità);

n = numero di giri;

$\rho_1(\%)$ = addensamento iniziale (autoaddensamento).

Dal grado di addensamento $\rho_n(\%)$ si può passare facilmente al valore dei vuoti tramite la seguente relazione:

$$V_n(\%) = 100 - \rho_n(\%) \quad (5.2)$$

dove

$V_n(\%)$ = percentuale dei vuoti al n-esimo giro.

Dall'analisi della curva di addensamento del provino si possono trarre alcune importanti considerazioni riguardanti le proprietà di addensabilità e lavorabilità della miscela, espresse rispettivamente dal parametro ρ_1 e da k . In genere valori maggiori di ρ_1 implicano una capacità di autoaddensamento iniziale della miscela migliore; in termini di lavorabilità sono da prediligere quelle miscele che, a parità di altre caratteristiche, mostrano valori di k superiori, ossia una maggiore pendenza della curva di addensamento.

5.2.1.1 Densità massima delle miscele

La normativa EN 12697-5 permette di determinare la massima densità di una miscela mediante procedura matematica, note le percentuali e le densità degli elementi che la costituiscono.

L'equazione di calcolo è la seguente:

$$\rho_m = \frac{100}{(p_{a1}/\rho_{a1}) + (p_{a2}/\rho_{a2}) + \dots + (p_b/\rho_b)} \quad (5.3)$$

dove

ρ_m = 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 44 miscele analizzate è stato possibile calcolare la massima densità ρ_m , corrispondente allo 0% di vuoti. In Tabella 5.7 sono riportati i dati di densità massima ρ_m per le miscele con polverino tradizionale, in Tabella 5.8 sono riportati quelli con polverino criogenico.

DENSITÀ MASSIMA MISCELE ρ_m (g/cm ³)						
Miscela - TCR%	0	1	2	3	4	5
3.0 Cemento - 3.5 Emulsione	2.52	2.51	2.50	2.48	2.47	2.46
1.5 Cemento - 3.5 Emulsione	2.52	2.50	2.49	2.48	2.46	2.45
3.0 Cemento - 5.0 Emulsione	2.49	2.48	2.46	2.45	2.44	2.42
1.5 Cemento - 5.0 Emulsione	2.48	2.47	2.46	2.44	2.43	2.42

Tabella 5.7: Valori di densità massima per le 4 miscele e i 6 dosaggi di TCR.

DENSITÀ MASSIMA MISCELE ρ_m (g/cm ³)						
Miscela - CCR%	0	1	2	3	4	5
3.0 Cemento - 3.5 Emulsione	2.52	2.51	2.50	2.48	2.47	2.45
1.5 Cemento - 3.5 Emulsione	2.52	2.50	2.49	2.47	2.46	2.45
3.0 Cemento - 5.0 Emulsione	2.49	2.48	2.46	2.45	2.44	2.42
1.5 Cemento - 5.0 Emulsione	2.48	2.47	2.46	2.44	2.43	2.41

Tabella 5.8: Valori di densità massima per le 4 miscele e i 6 dosaggi di CCR.

I dati calcolati sopra possono essere riassunti in un grafico riassuntivo che riporta, in ascissa, i tenori di polverino di gomma e, in ordinata, i valori di densità massima per ciascuna miscela studiata e per entrambi i tipi di polverino (Figura 5.11, Figura 5.12). L'andamento lineare decrescente della densità massima delle miscele è dovuto alla sostituzione della parte fine del RA (0-5 mm) con percentuali crescenti linearmente di polverino di gomma, a parità di volume.

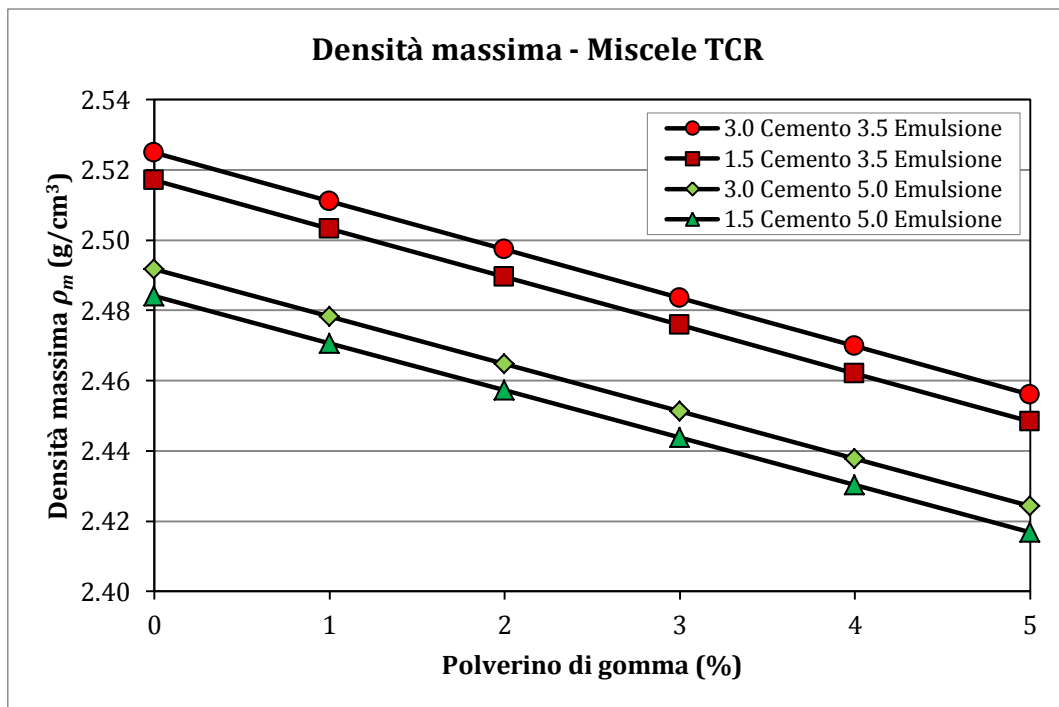


Figura 5.11: Andamento della massima densità con l'aumentare del polverino TCR.

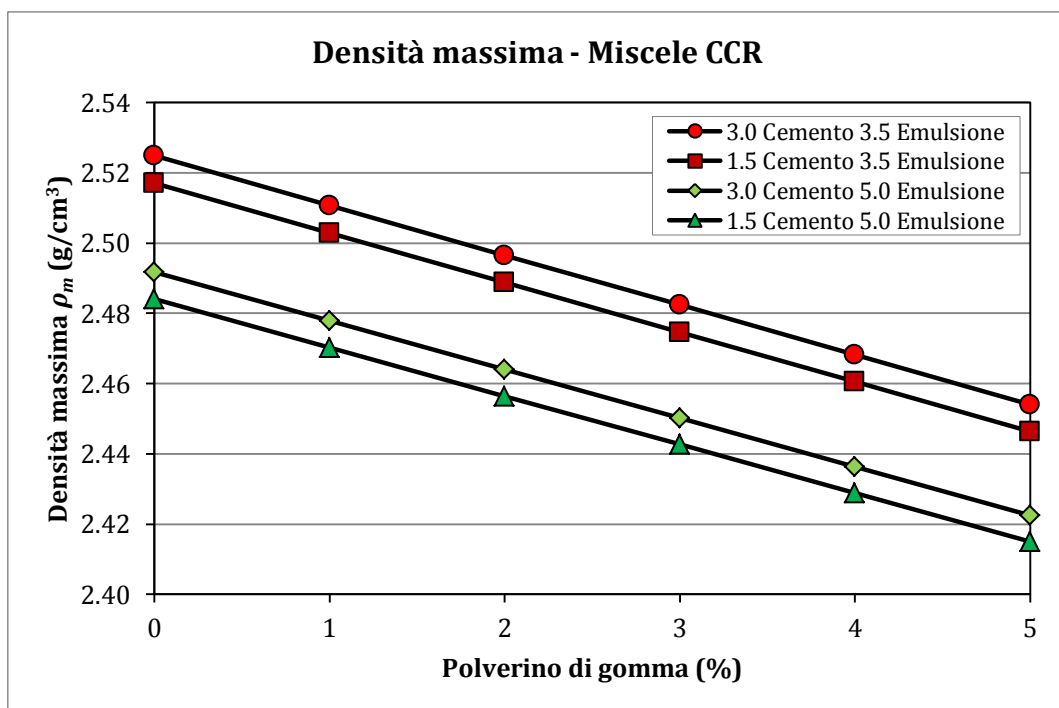


Figura 5.12: Andamento della massima densità con l'aumentare del polverino CCR.

I calcoli necessari per la realizzazione delle curve riportate in Figura 5.11 e Figura 5.12 hanno tenuto conto delle seguenti densità per i singoli elementi della miscela (Tabella 5.9).

COMPONENTE	DENSITÀ (g/cm ³)
RA 10-10+	2.621
RA 5-10	2.626
RA 0-5	2.530
Filler	2.700
Cemento	3.200
Polverino tradizionale TCR	1.121
Polverino criogenico CCR	1.080
Emulsione bituminosa	1.000

Tabella 5.9: Densità degli elementi delle miscele.

La differenza in termini di densità tra il polverino tradizionale e quello criogenico è minima: 0.041 g/cm³.

Il salto evidenziato dalle curve con lo stesso tenore di emulsione bituminosa è causato dalla diversa densità del filler e del cemento; essendo la densità del primo inferiore rispetto a quella del secondo, anche la densità massima della miscela con filler e cemento risulta più bassa rispetto a quella con solo cemento.

Infine anche l'aumento della percentuale di emulsione bituminosa, quindi di bitume nella miscela comporta una diminuzione della massima densità ottenibile.

5.2.1.2 Curve di addensamento dei provini

Nelle seguenti figure è riportato il grado di addensamento percentuale $\rho_m\%$ dei

provini in funzione del numero di giri eseguiti dal compattatore giratorio, in scala logaritmica. Il grado di addensamento $\rho_m\%$ è stato calcolato dal rapporto percentuale tra la densità misurata in fase di compattazione e quella massima raggiungibile dalla singola miscela, i cui valori sono riportati in Tabella 5.7 e Tabella 5.8, rispettivamente per il polverino di gomma tradizionale TCR e per quello criogenico CCR.

La Figura 5.13 e la Figura 5.14 si riferiscono alle miscele contenenti cemento in tenore del 3.0%, emulsione di bitume in tenore del 3.5% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR, comprese tra 0% e 5%.

La Figura 5.15 e la Figura 5.16 si riferiscono alle miscele contenenti cemento in tenore del 1.5%, emulsione di bitume in tenore del 3.5% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR, comprese tra 0% e 5%.

La Figura 5.17 e la Figura 5.18 si riferiscono alle miscele contenenti cemento in tenore del 3.0%, emulsione di bitume in tenore del 5.0% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR, comprese tra 0% e 5%.

La Figura 5.19 e la Figura 5.20 si riferiscono alle miscele contenenti cemento in tenore del 1.5%, emulsione di bitume in tenore del 5.0% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR, comprese tra 0% e 5%.

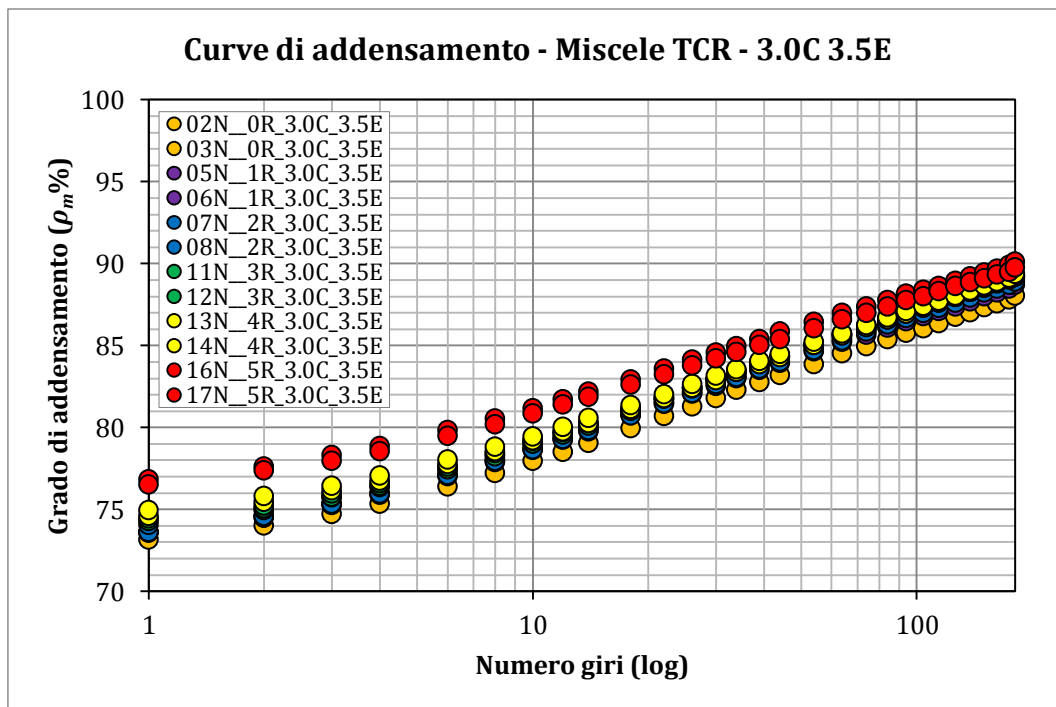


Figura 5.13: Curve di addensamento (ρ_m %). 3.5% emulsione, 3.0% cemento, polverino TCR.

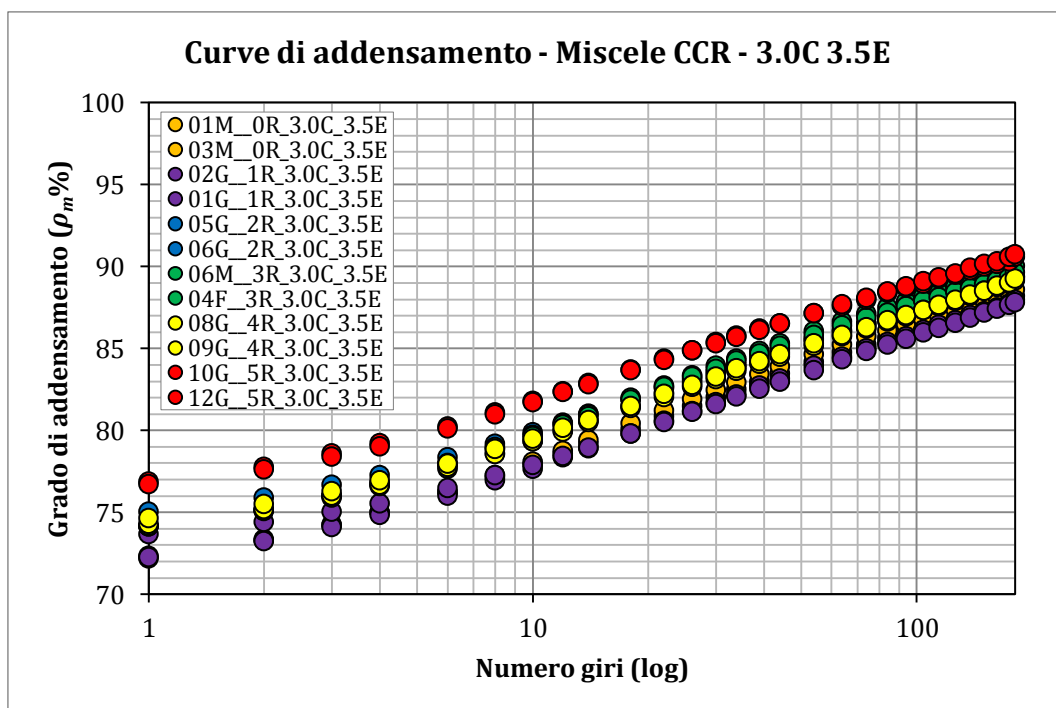


Figura 5.14: Curve di addensamento (ρ_m %). 3.5% emulsione, 3.0% cemento, polverino CCR.

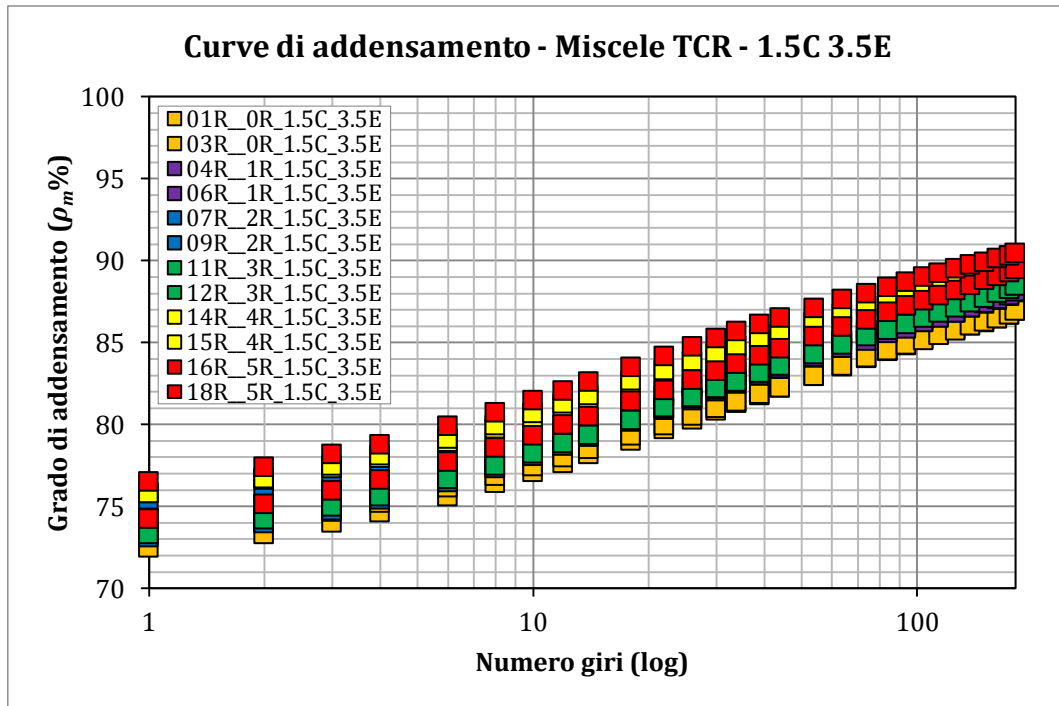


Figura 5.15: Curve di addensamento ($\rho_m\%$). 3.5% emulsione, 1.5% cemento, polverino TCR.

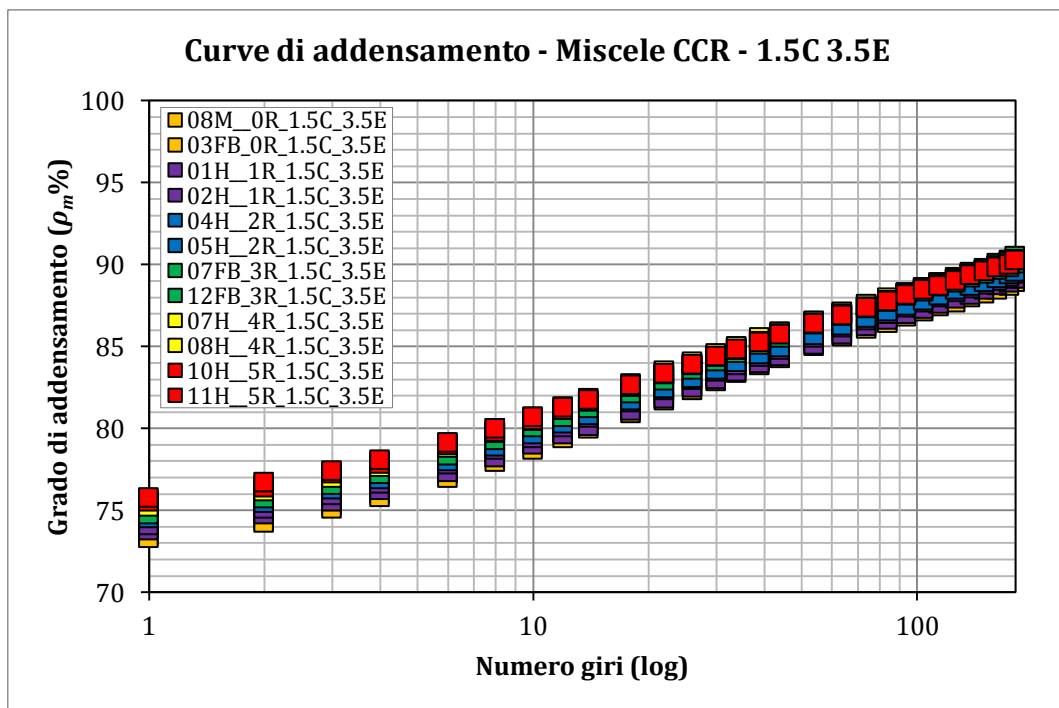


Figura 5.16: Curve di addensamento ($\rho_m\%$). 3.5% emulsione, 1.5% cemento, polverino CCR.

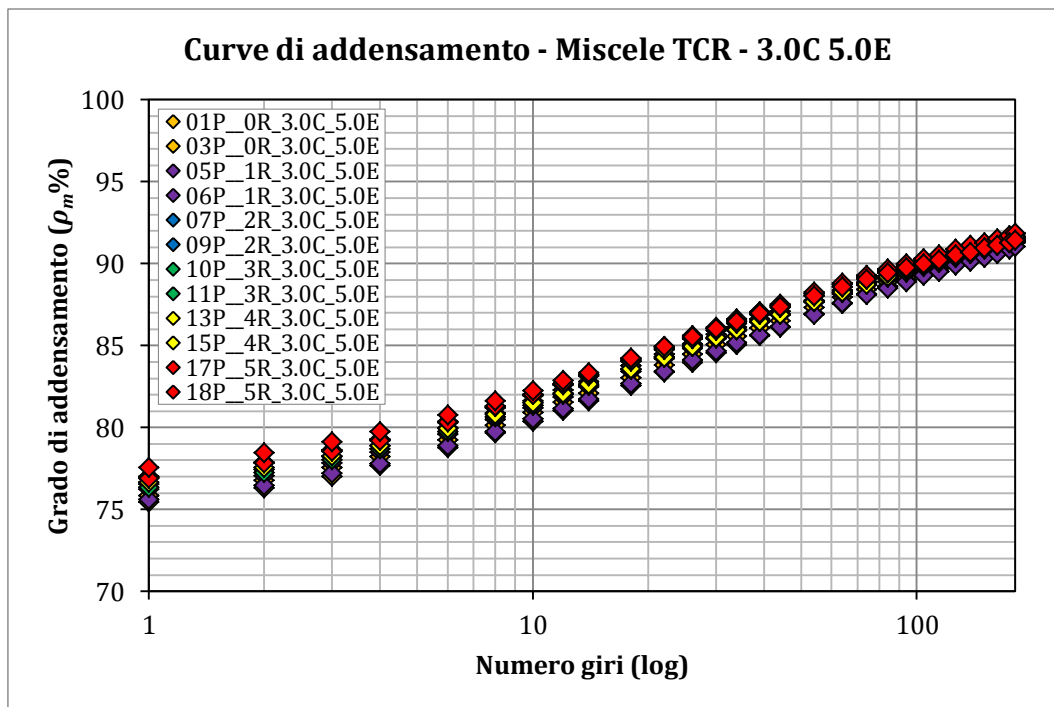


Figura 5.17: Curve di addensamento (ρ_m %). 5.0% emulsione, 3.0% cemento, polverino TCR.

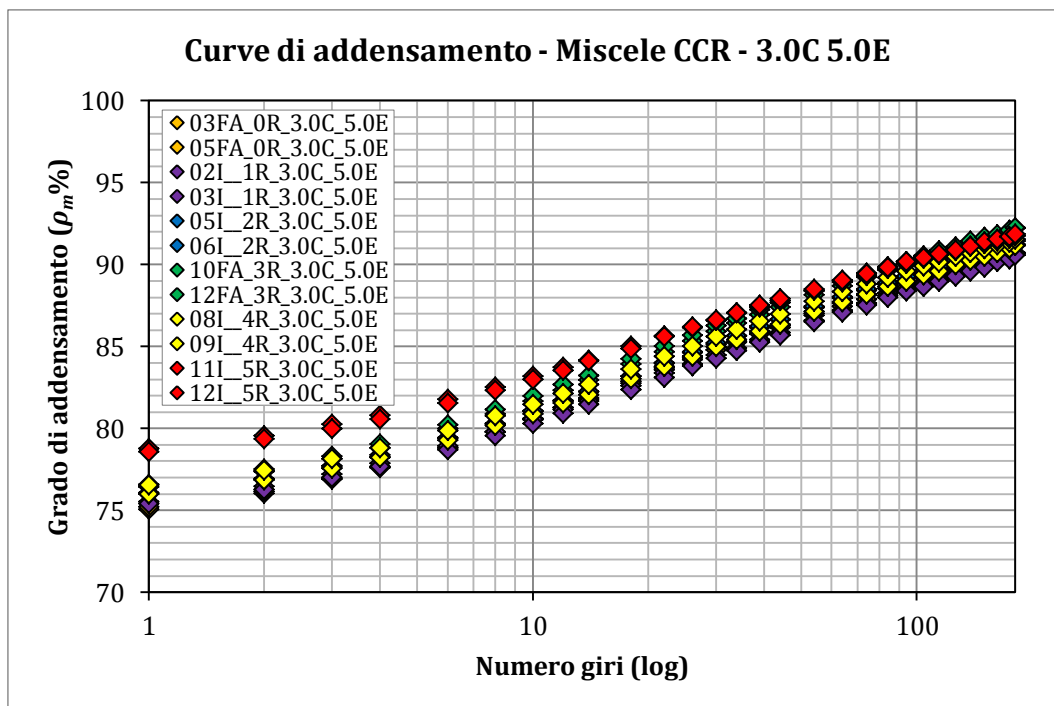


Figura 5.18: Curve di addensamento (ρ_m %). 5.0% emulsione, 3.0% cemento, polverino CCR.

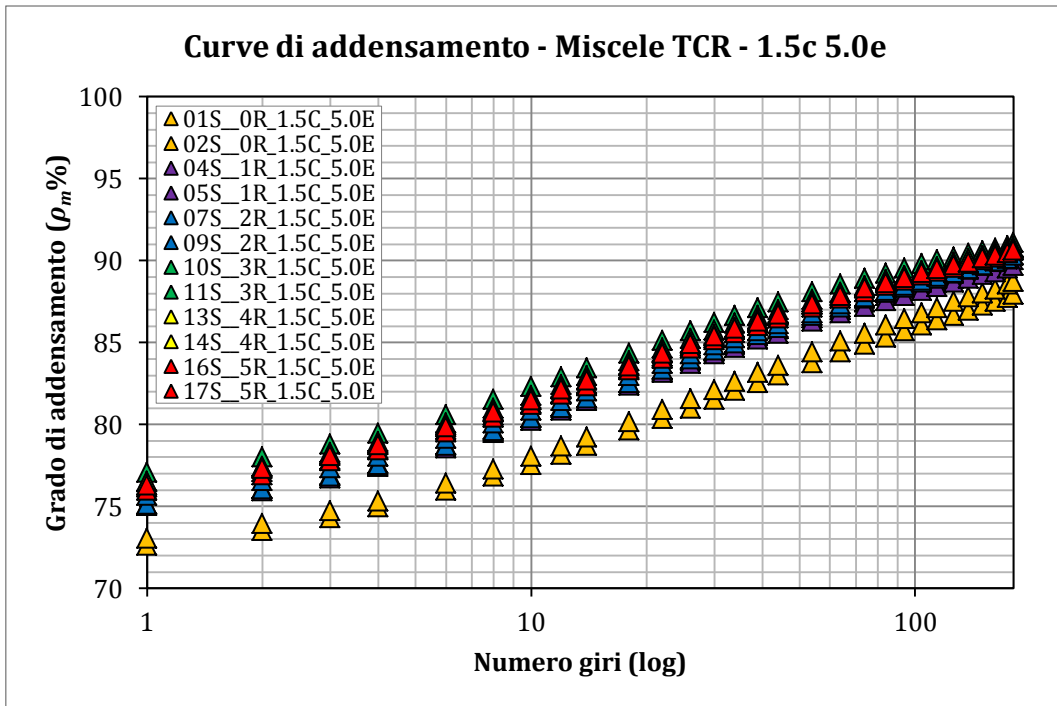


Figura 5.19: Curve di addensamento (ρ_m %). 5.0% emulsione, 1.5% cemento, polverino TCR.

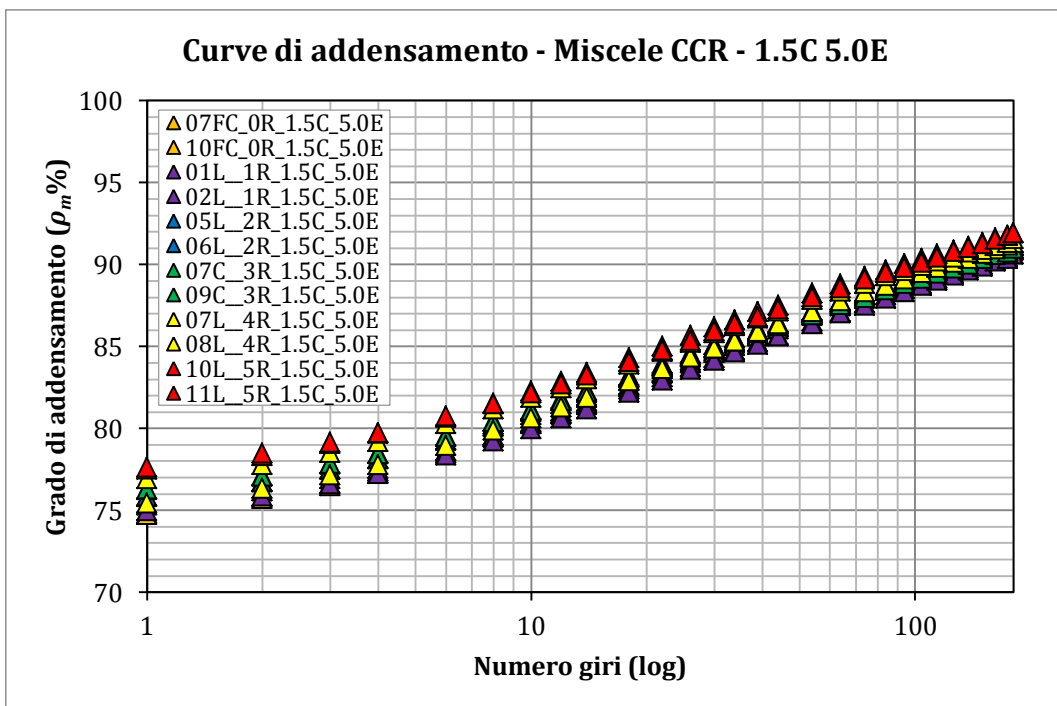


Figura 5.20: Curve di addensamento (ρ_m %). 5.0% emulsione, 1.5% cemento, polverino CCR.

I grafici e i dati mediati di ciascuna miscela mostrano che, ad un incremento di polverino di entrambe le tipologie, corrisponde un valore di autoaddensamento $\rho_1(\%)$ della miscela maggiore (Tabella 5.10). Tale incremento, seppure di entità leggermente inferiore, si osserva anche per i valori relativi al grado di addensamento raggiunto al termine della compattazione (Tabella 5.11); in termini assoluti la variazione di $\rho_{180}(\%)$ è compresa nell'intervallo tra 88% e 92%.

MISCELA		$\rho_1(\%)$									
%CR	0	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
3.0C_3.5E	73.1	73.8	73.6	74.3	74.9	76.5	73.2	74.3	75.1	74.8	76.9
1.5C_3.5E	73.2	73.7	74.2	74.3	76.0	75.5	74.3	75.3	75.2	75.3	75.2
3.0C_5.0E	75.7	76.3	77.0	76.2	76.5	76.9	75.5	75.8	76.7	76.7	78.4
1.5C_5.0E	74.6	75.3	75.7	76.9	76.6	76.5	75.5	75.6	76.3	76.8	77.7
TCR						CCR					

Tabella 5.10: Valori medi di auto addensamento $\rho_1(\%)$.

MISCELA		$\rho_{180}(\%)$									
%CR	0	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
3.0C_3.5E	88.1	88.9	88.9	89.0	89.4	89.9	88.3	89.0	89.5	89.4	90.7
1.5C_3.5E	88.2	88.1	89.0	88.9	89.8	90.0	89.6	90.0	89.9	90.1	90.1
3.0C_5.0E	90.9	91.3	91.7	91.5	91.6	91.6	90.4	91.3	91.4	91.3	91.7
1.5C_5.0E	89.9	90.0	90.5	90.6	90.7	90.7	90.8	91.0	91.9	91.9	91.8
TCR						CCR					

Tabella 5.11: Valori medi di addensamento finale $\rho_{180}(\%)$.

Se si confrontano invece miscele omologhe contenenti differente tipologia di polverino, non si evidenziano variazioni rilevanti con l'utilizzo di polverino di gomma tradizionale o criogenico.

Per quanto riguarda invece il contributo degli altri due elementi principali, si giunge alle seguenti considerazioni. La variazione del tenore di cemento non influenza in maniera rilevante l'autocompattazione e la lavorabilità della miscela: a parità di contenuto di emulsione bituminosa il cemento non altera in maniera evidente le proprietà delle miscele. L'incremento della percentuale di emulsione bituminosa, che per le sue proprietà ha una maggiore funzione lubrificante, migliora la lavorabilità della miscela: a parità di cemento l'aumento di emulsione consente il raggiungimento di un grado di addensamento percentuale superiore e una minore dispersione tra le curve delle diverse miscele.

5.2.2 VARIAZIONE DELLE CARATTERISTICHE POST COMPATTAZIONE

Un aspetto molto importante da non sottovalutare è il fenomeno di rigonfiamento o ritorno elastico che è avvenuto nei campioni contenenti polverino di gomma, nella fase di postcompattazione. Tutte le miscele che contengono tale componente hanno esibito, seppure in maniera contenuta, un incremento di volume rispetto al grado di addensamento raggiunto al termine della compattazione; ciò si ripercuote naturalmente sulle caratteristiche volumetriche del provino stesso.

Si ritiene che questo fenomeno sia dovuto principalmente alla natura elastica del polverino di gomma che, una volta rimosso lo stato tensionale di compressione esercitato durante la compattazione, tende a restituire le deformazioni reversibili e a recuperare la sua configurazione originale, compatibilmente con la matrice litica che si è strutturata.

La valutazione del decremento del grado di addensamento $\rho_m\%$ è stata calcolata

considerando due momenti successivi della fase di maturazione (paragrafo 5.1.3):

- $T_1 = 0$, al termine della compattazione;
- $T_2 = 3$ gg, prima fase di maturazione in stufa a 40°C .

Nei grafici seguenti si riportano sull'asse delle ascisse le diverse percentuali di polverino tradizionale e criogenico, sull'asse sinistro delle ordinate il grado di addensamento percentuale al tempo T_1 e T_2 , indicato rispettivamente con $\rho_m\%T_1$ e $\rho_m\%T_2$ e sull'asse destro delle ordinate la differenza $\Delta\rho_m\%$. I dati e la corrispondente linea di tendenza rappresentati in verde si riferiscono al valore del grado di addensamento $\rho_m\%T_1$; i dati e la corrispondente linea di tendenza rappresentati in rosso si riferiscono al valore del grado di addensamento $\rho_m\%T_2$. In blu sono riportate le differenze tra le misurazioni $\Delta\rho_m\%$ e la linea di tendenza che ne descrive l'andamento.

La Figura 5.21 e la Figura 5.22 si riferiscono alle miscele contenenti cemento in tenore del 3.0%, emulsione di bitume in tenore del 3.5% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR. La Figura 5.23 e la Figura 5.24 si riferiscono alle miscele contenenti cemento in tenore del 1.5%, emulsione di bitume in tenore del 3.5% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR.

La Figura 5.25 e la Figura 5.26 si riferiscono alle miscele contenenti cemento in tenore del 3.0%, emulsione di bitume in tenore del 5.0% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR. La Figura 5.27 e la Figura 5.28 si riferiscono alle miscele contenenti cemento in tenore del 1.5%, emulsione di bitume in tenore del 5.0% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR.

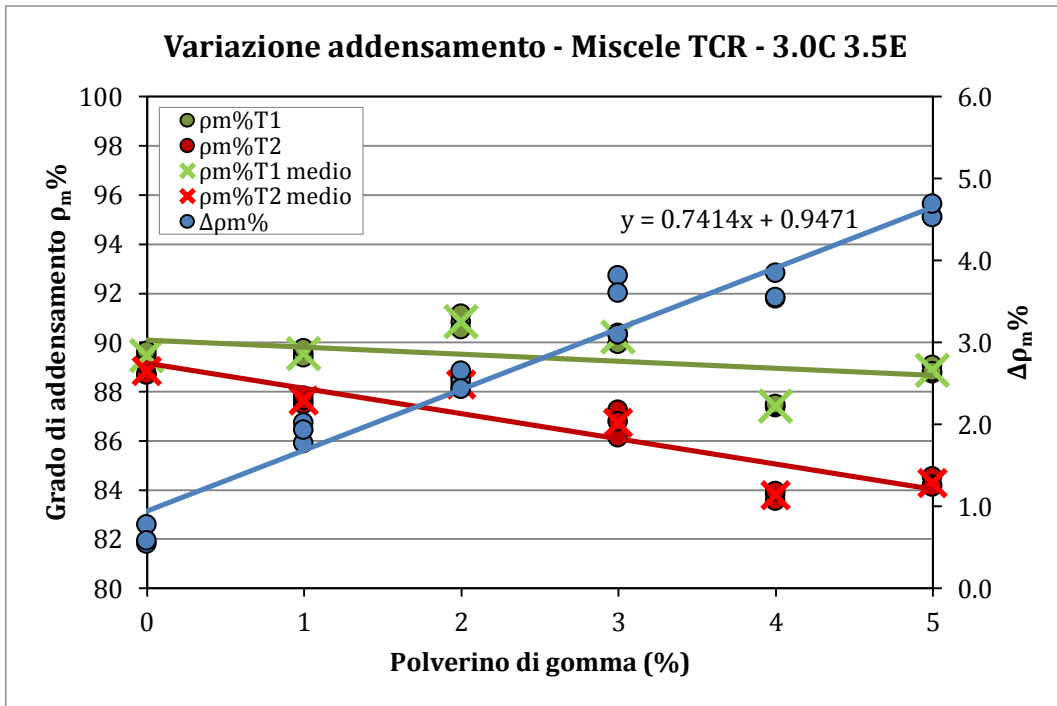


Figura 5.21: Variazione grado di addensamento. 3.5% emulsione, 3.0% cemento, polverino TCR.

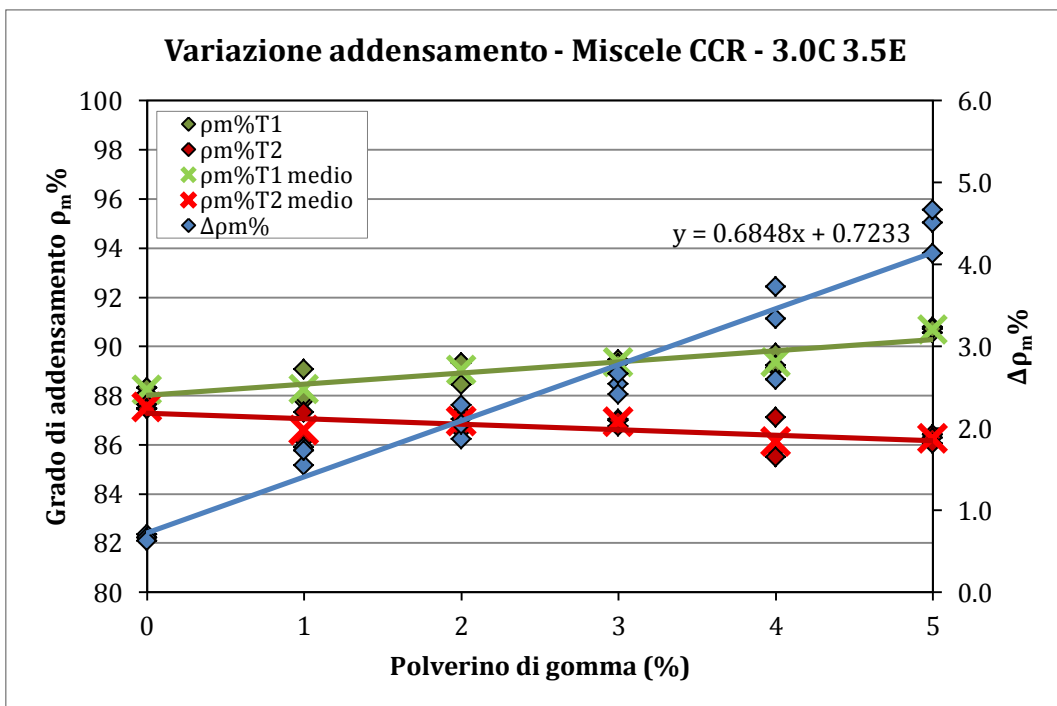


Figura 5.22: Variazione grado di addensamento. 3.5% emulsione, 3.0% cemento, polverino CCR.

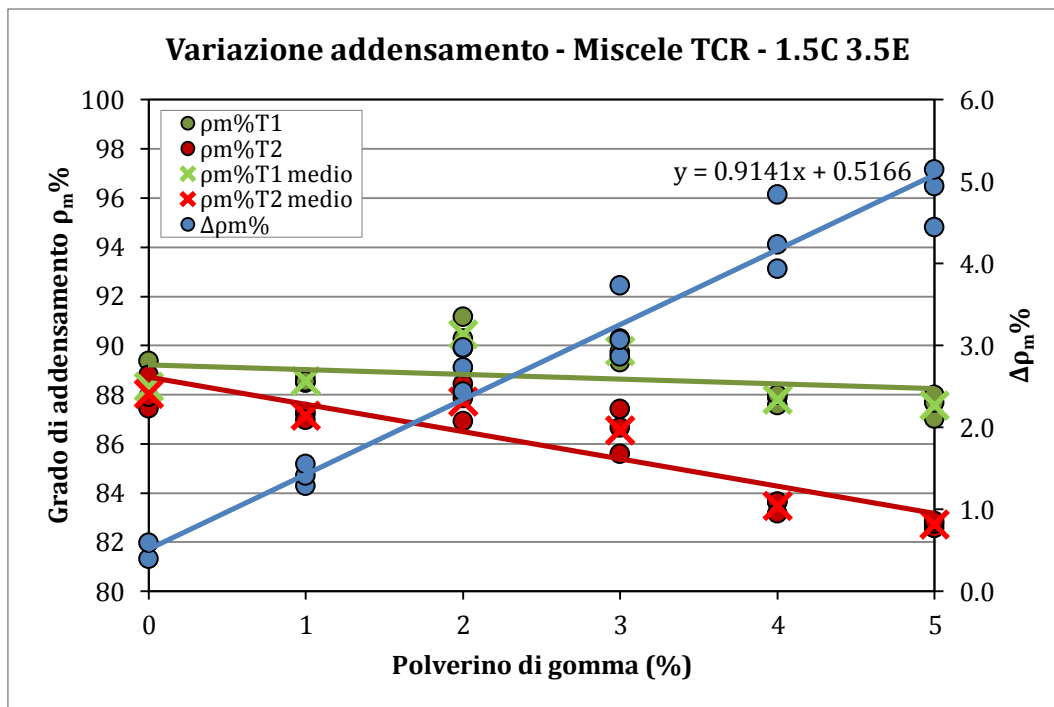


Figura 5.23: Variazione grado di addensamento. 3.5% emulsione, 1.5% cemento, polverino TCR.

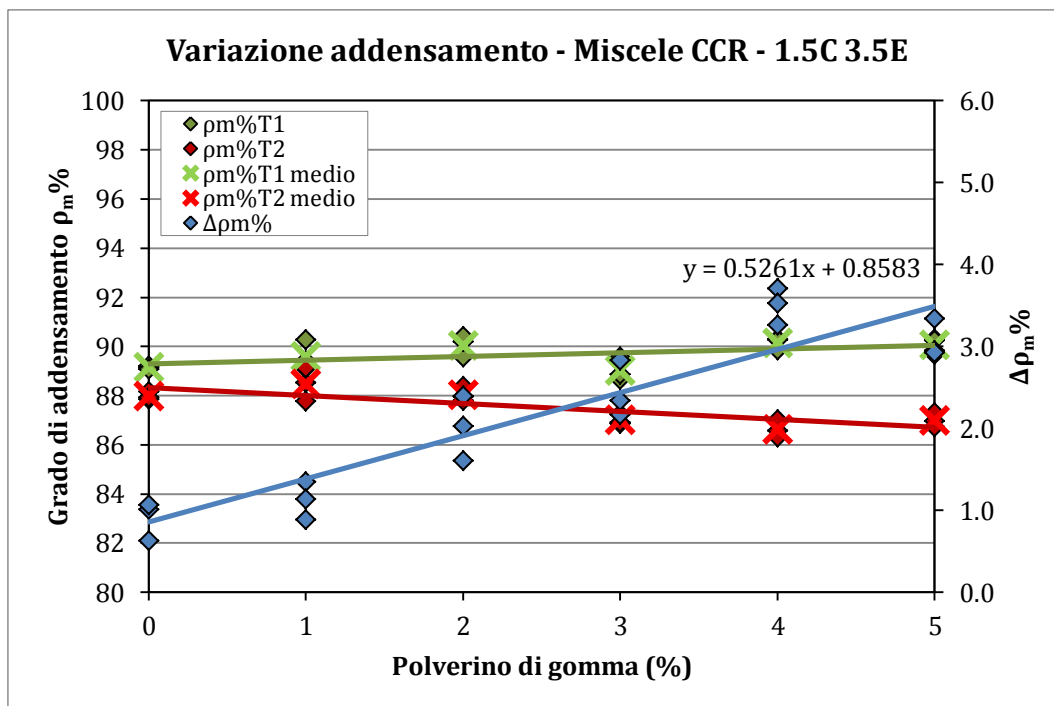


Figura 5.24: Variazione grado di addensamento. 3.5% emulsione, 1.5% cemento, polverino CCR.

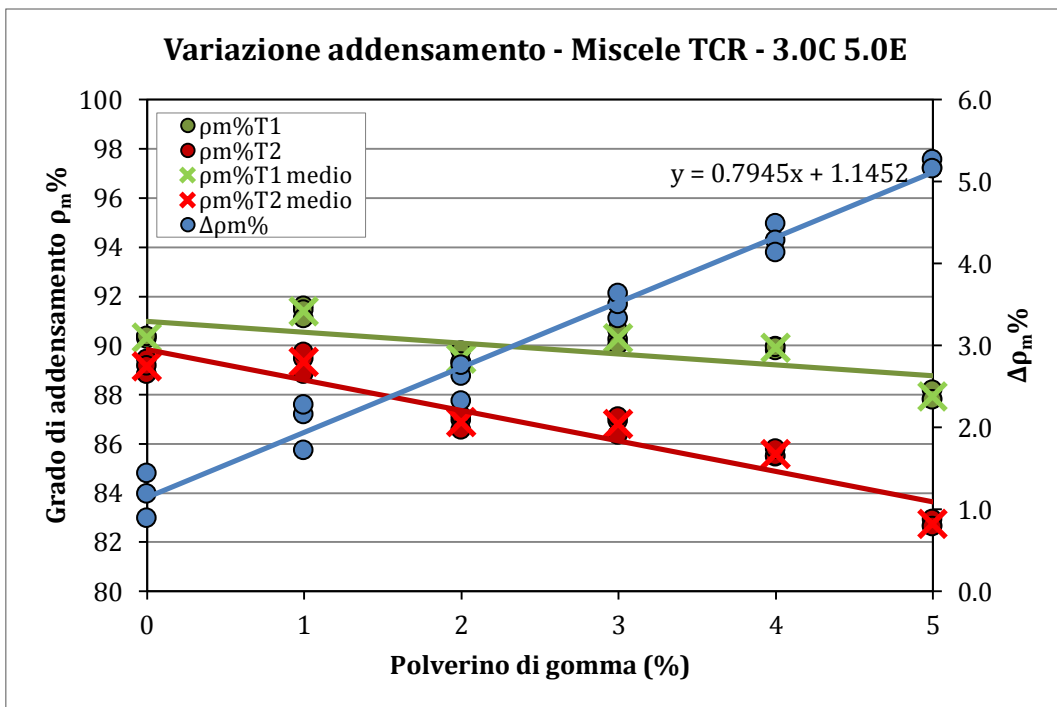


Figura 5.25: Variazione grado di addensamento. 5.0% emulsione, 3.0% cemento, polverino TCR.

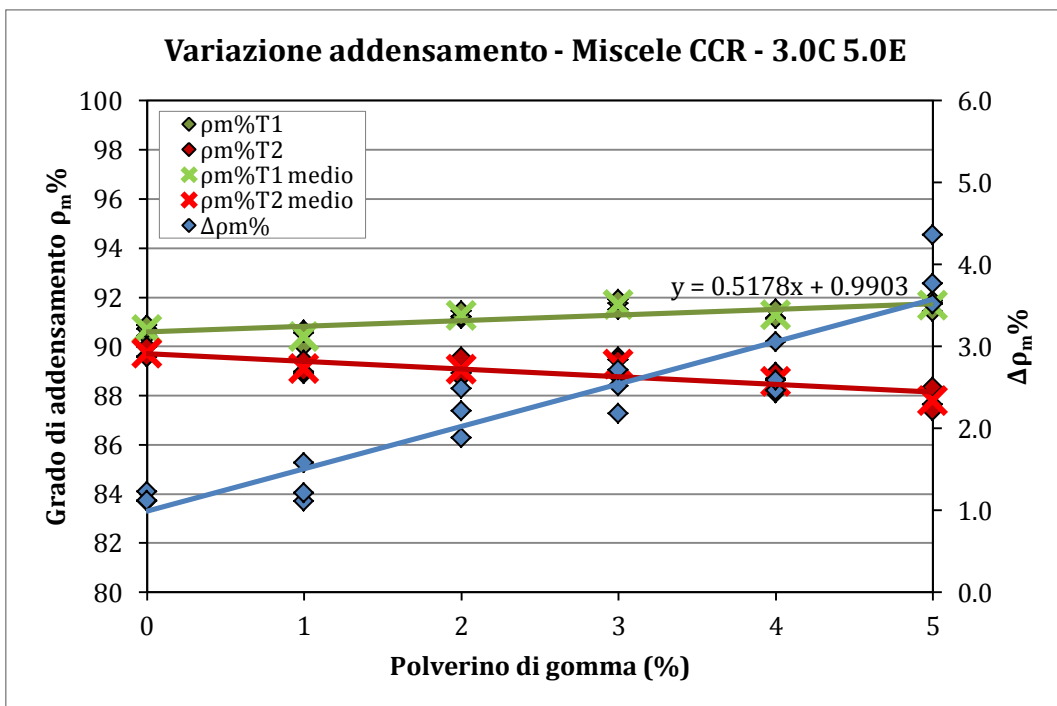


Figura 5.26: Variazione grado di addensamento. 5.0% emulsione, 3.0% cemento, polverino CCR.

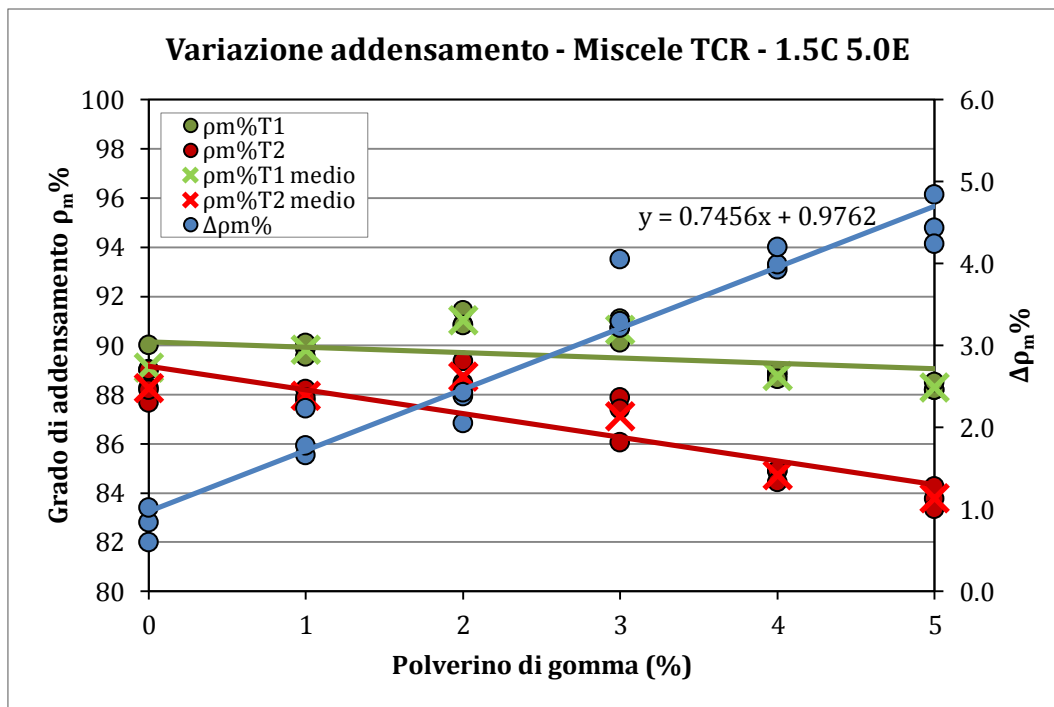


Figura 5.27: Variazione grado di addensamento. 5.0% emulsione, 1.5% cemento, polverino TCR.

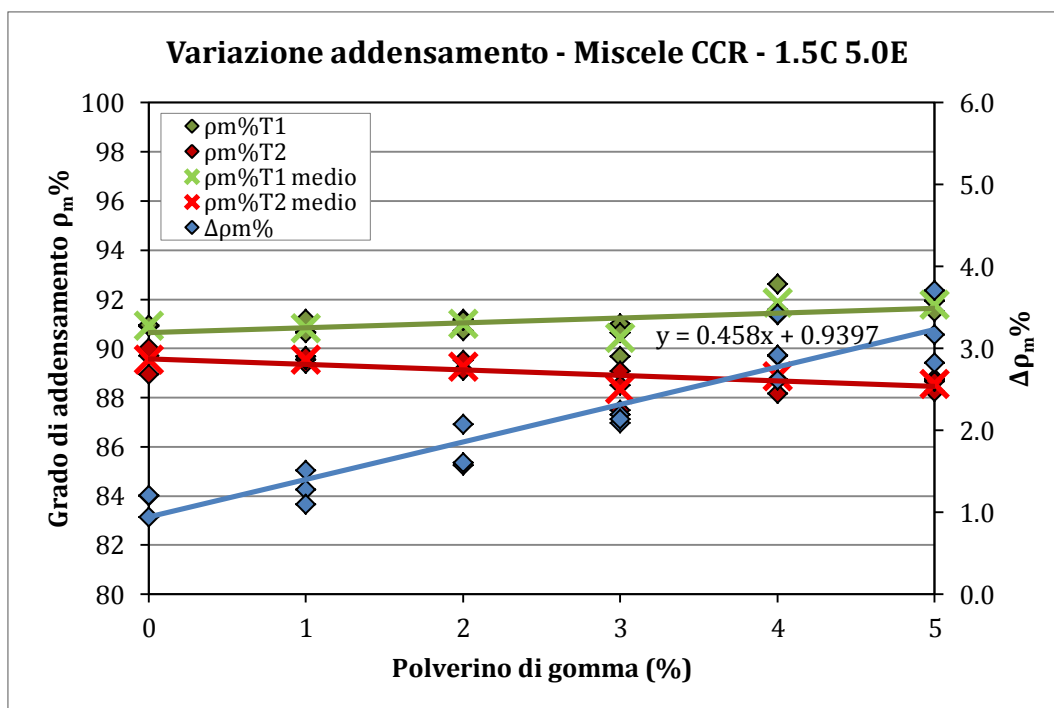


Figura 5.28: Variazione grado di addensamento. 5.0% emulsione, 1.5% cemento, polverino CCR.

La prima cosa da evidenziare è che il decremento dell'addensamento percentuale è direttamente proporzionale al contenuto di polverino all'interno del provino. Per valori crescenti della quantità di polverino presente si hanno valori decrescenti del $\rho_m\%$ oppure, inversamente, valori crescenti della differenza $\Delta\rho_m\%$. quest'ultima raggiunge il massimo livello per ciascuna miscela in corrispondenza del maggior tenore di polverino di gomma, indipendentemente dalla tipologia. Tale tendenza, comune a tutte le miscele, conferma che la maggiore responsabile della variazione delle caratteristiche volumetriche sia la natura elastica del polverino di gomma.

In realtà anche l'emulsione bituminosa contribuisce al ritorno elastico del campione, seppure in quota minore. L'effetto imputabile alla sola emulsione è evidente per i provini nei quali non è presente polverino (CR 0%): nelle miscele ricche di emulsione la perdita di $\rho_m\%$ è valutabile attorno all'1% mentre in quelle povere di emulsione si riduce allo 0.5%. Nell'interazione con il polverino, invece, l'emulsione evidenzia un comportamento leggermente diverso. All'aumentare della percentuale di polverino, in particolare per le miscele con il 5% di CR, l'aggiunta di emulsione tende a ridurre il $\Delta\rho_m\%$; tale andamento è molto più evidente e lineare nei provini con polverino criogenico CCR e meno in quelli con il polverino tradizionale TCR. La spiegazione di tale comportamento sembrerebbe legata ad una buona affinità tra i due materiali, alla granulometria dei due polverini e alla capacità legante dell'emulsione.

L'affinità tra cemento e polverino non sembrerebbe essere altrettanto efficace; infatti, a parità di contenuto di emulsione bituminosa e per percentuali crescenti di polverino, le miscele più ricche di cemento presentano un maggiore rigonfiamento e

valori di $\Delta\rho_m\%$ superiori. Aumentando il tenore di emulsione, l'interazione tra i tre elementi migliora e il ritorno elastico tende a diminuire. Come già menzionato in precedenza per l'emulsione e il polverino, anche in questo caso tale andamento è più evidente e lineare nei provini con polverino criogenico CCR rispetto a quelli con il polverino tradizionale TCR.

Dal confronto tra i due tipi di polverino di gomma si evince che quello criogenico CCR restituisce risultati migliori in termini di recupero elastico, ossia la differenza di addensamento all'istante T_1 e T_2 sono di entità inferiore rispetto alla corrispondente miscela con polverino tradizionale TCR. Si ritiene che tale comportamento sia attribuibile alla diversa composizione granulometrica: la pezzatura più fine del CCR inserita all'interno della matrice del campione tenderebbe ad accentuare meno il fenomeno del ritorno elastico. Per i provini con TCR i valori di $\Delta\rho_m\%$ si attestano nell'intervallo tra 1.5% e 2.0%, per le miscele con 1% di polverino e crescono fino ad un massimo di 4.5%-5.0%, per le miscele con 5 % dello stesso. Per gli equivalenti provini con polverino di gomma CCR l'abbassamento relativo, per ciascuna percentuale, è in media di una quantità compresa tra 0.5% e 1%.

In conclusione, sembrerebbe risultare che, in termini di caratteristiche volumetriche del provino compattato, il polverino di gomma criogenico CCR presenti maggiori affinità con la matrice litica e con i leganti, producendo un rigonfiamento elastico di entità inferiore rispetto al polverino di gomma tradizionale TCR.

5.2.3 ANALISI AL MICROSCOPIO ELETTRONICO

A conclusione dell'analisi delle proprietà volumetriche si riportano alcune

immagini realizzate al microscopio elettronico presso il Centro Ceramico di Bologna. Da Figura 5.29 a Figura 5.34 sono riportate le foto eseguite sul mastice costituito da emulsione di bitume, cemento e polverino di gomma. Tali ingrandimenti permettono di apprezzare la modalità con cui il polverino di gomma interagisce con la matrice legante. Laddove non completamente rivestito il polverino risulta ben visibile e distinguibile. Non avendo natura porosa e non presentando caratteristiche di adesione superficiale, esso non è in grado di assorbire il mastice o di farlo compenetrare al suo interno. La funzione legante sembra quindi essere esercitata quasi esclusivamente da un'azione di rivestimento ed adesione, in particolare dovuta all'emulsione. La matrice legante stessa, fotografata in dettaglio in Figura 5.34, non presenta una superficie regolare e fluida, come nei casi in cui è presente unicamente legante bituminoso; la natura granulare è attribuibile alla presenza del cemento.

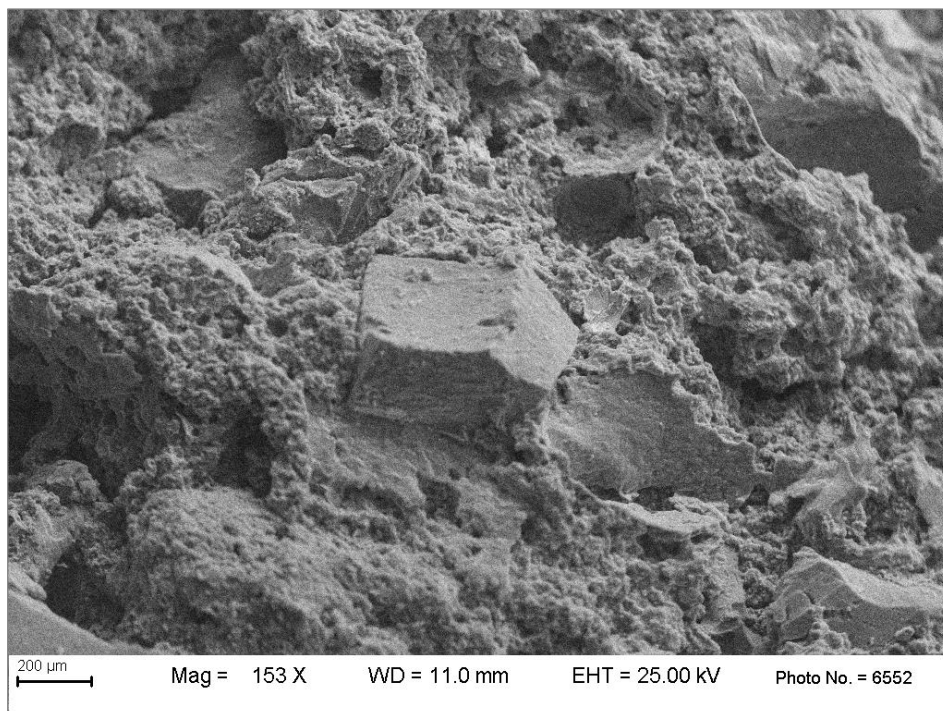


Figura 5.29: Mastice al microscopio elettronico. Dettaglio CR (153X).

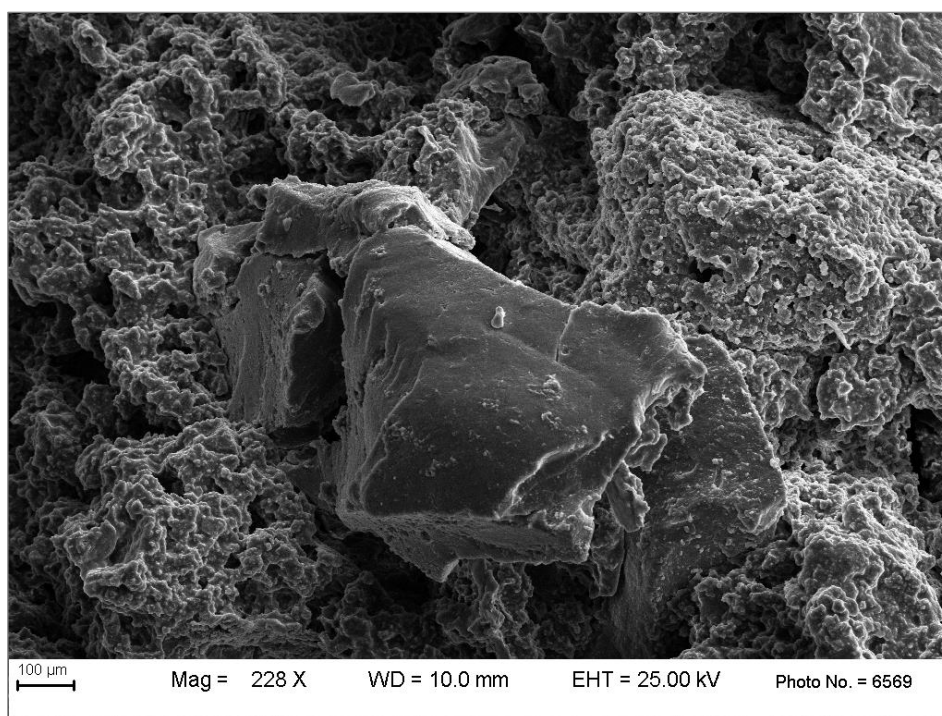


Figura 5.30: Mastice al microscopio elettronico. Dettaglio CR (228X).

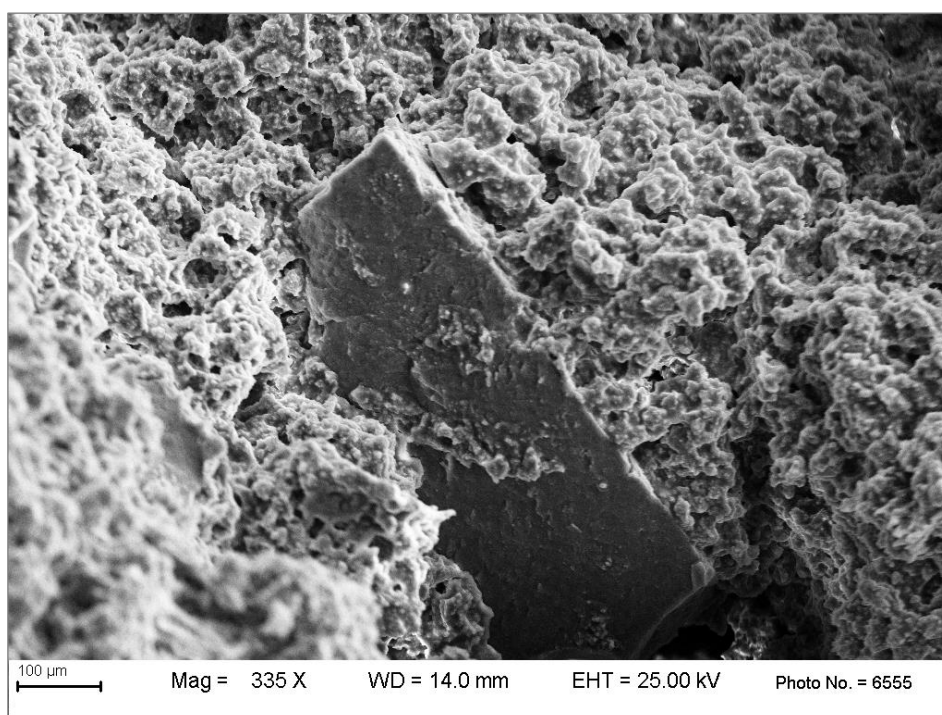


Figura 5.31: Mastice al microscopio elettronico. Dettaglio CR (335X).

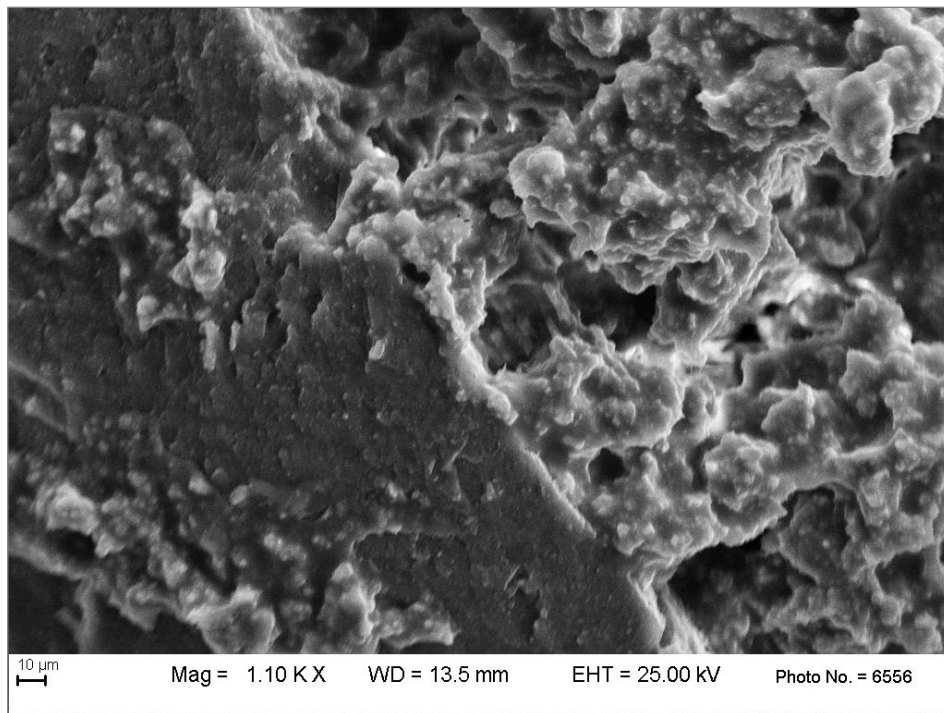


Figura 5.32: Mastice al microscopio elettronico. Interfaccia CR-matrice legante (1.10KX).

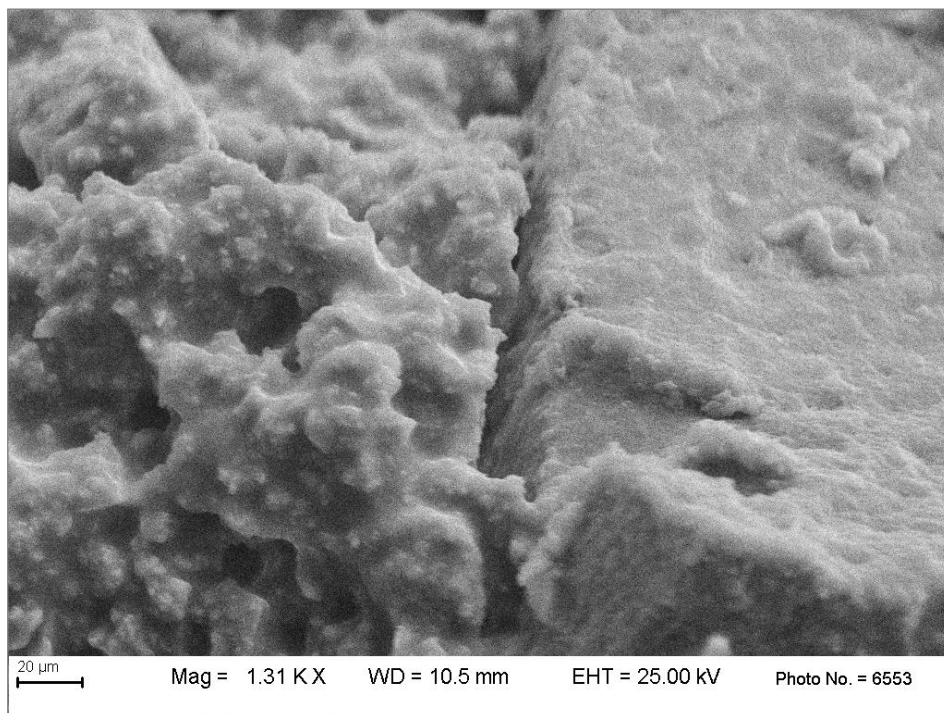


Figura 5.33: Mastice al microscopio elettronico. Interfaccia CR-matrice legante (1.31KX).

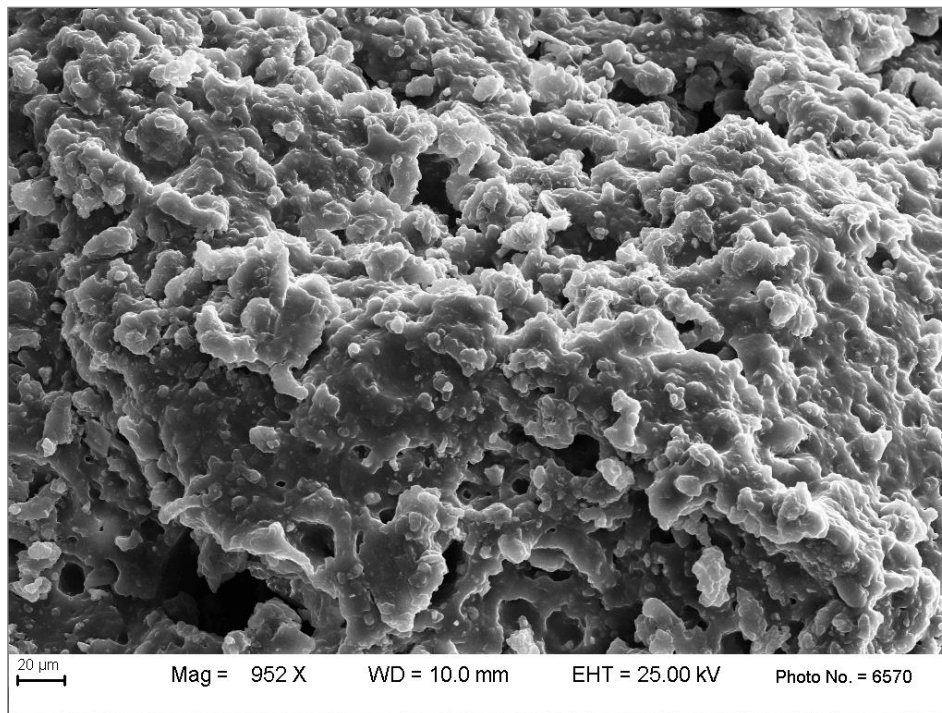


Figura 5.34: Mastice al microscopio elettronico. Dettaglio matrice emulsione e cemento (952X).

Da Figura 5.35 a Figura 5.37 sono riportati gli ingrandimenti eseguiti su un campione di conglomerato, ossia mastice (emulsione, cemento e polverino) più fresato. La Figura 5.35 fornisce un dettaglio d'insieme della struttura, dove aggregati di recupero, matrice legante e polverino di gomma sono miscelati uniformemente. Non si riscontrano, infatti, zone contraddistinte da disomogeneità evidenti.

La Figura 5.36 successiva fa risaltare il rivestimento degli aggregati per opera del legante bituminoso e cementizio; in particolare, le zone più uniformi indicano la presenza dell'emulsione di bitume con le sue proprietà di adesione e coesione e la sua natura viscosa.

La Figura 5.37 mostra l'inclusione della particella di polverino di gomma all'interno della matrice litica degli aggregati.

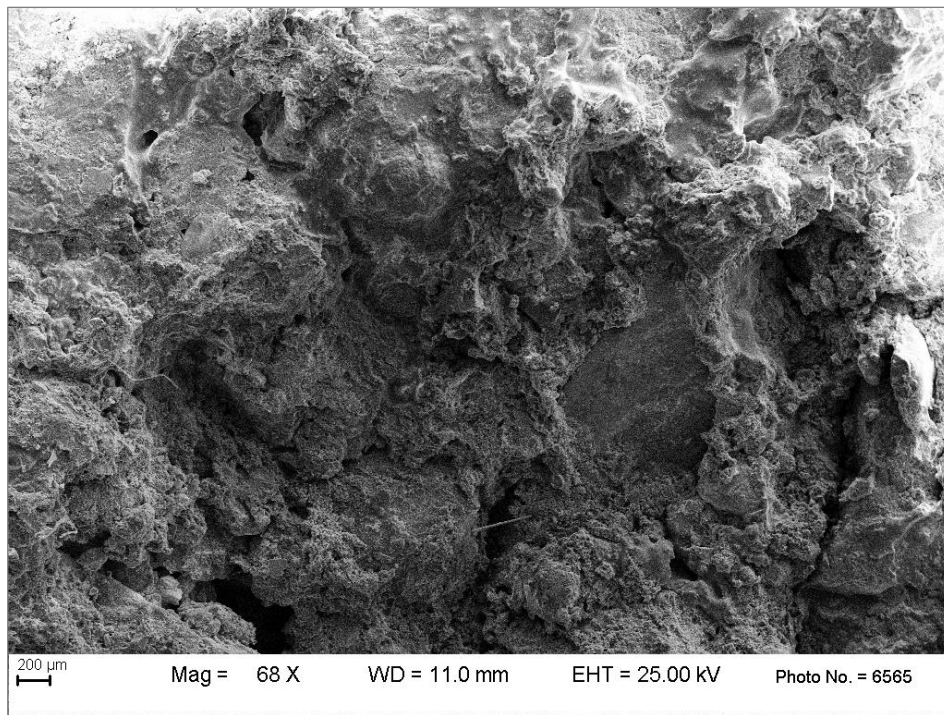


Figura 5.35: Campione di conglomerato al microscopio elettronico. Dettaglio d'insieme.

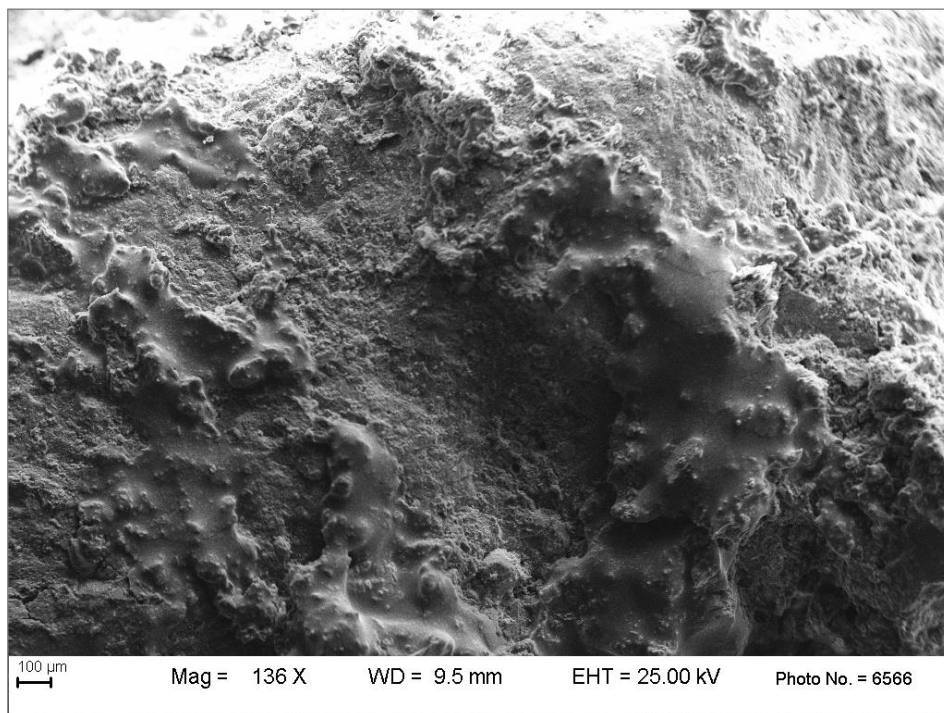


Figura 5.36: Campione di conglomerato al microscopio elettronico. Dettaglio mastice.

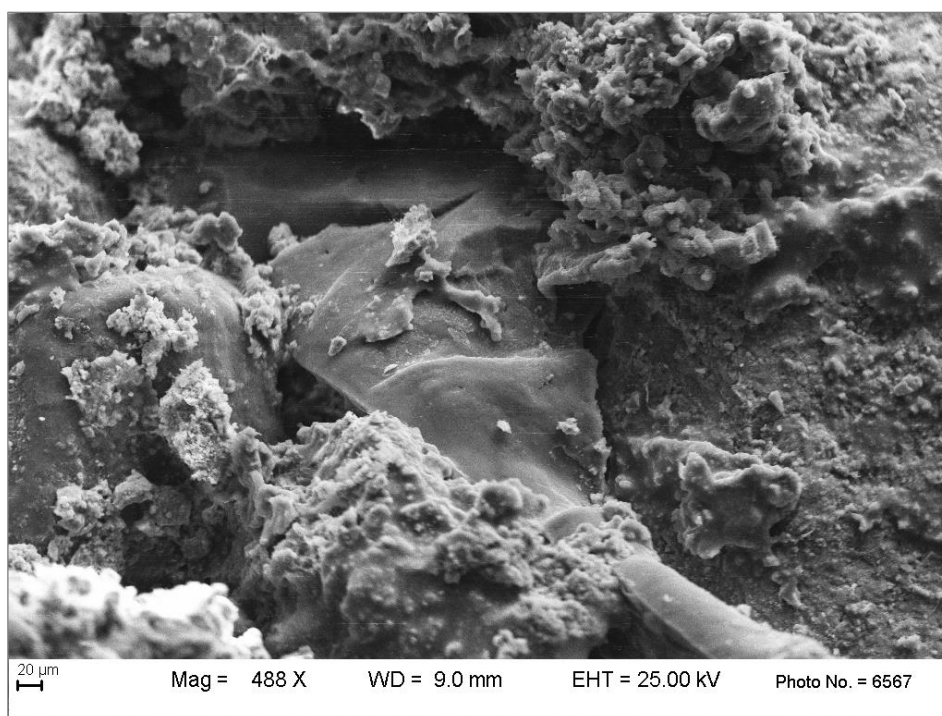


Figura 5.37: Campione di conglomerato al microscopio elettronico. Dettaglio polverino.

5.3 PROVA DI RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA ITS

5.3.1 PROCEDURA E ATTREZZATURA DI PROVA

Si definisce resistenza a trazione indiretta ITS (*Indirect Tensile Strength*) la massima tensione di trazione (calcolata) che un provino cilindrico, sollecitato a compressione diametrale alla temperatura e velocità di prova prefissate, è in grado di sopportare. Tale caratteristica consente di stabilire dei criteri di qualità ed accettabilità delle miscele, sia in fase di studio degli impasti sia in fase di esercizio in opera.

Le specifiche riguardanti la procedura e i dispositivi sono riportate nella norma EN 12697-23: Miscele bituminose. Metodi di prova per conglomerati bituminosi a

caldo. Parte 23: Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi.

Il test si esegue su campioni con diametro di 100 mm, 150 mm o 160 mm ad una temperatura compresa tra 5°C e 25°C; in questa indagine, così come previsto dalla prassi comune, la prova è stata condotta alla temperatura di 25°C su campioni con diametro di 150 mm, confezionati e maturati come descritto in precedenza (paragrafo 5.1). I singoli provini, dopo un condizionamento per 5 ore in camera termostatica a 25°C, sono opportunamente sistemati e centrati tra i coltelli di carico della pressa.

Lo schema di carico, il telaio ed i dispositivi di prova sono riportati in Figura 5.38.

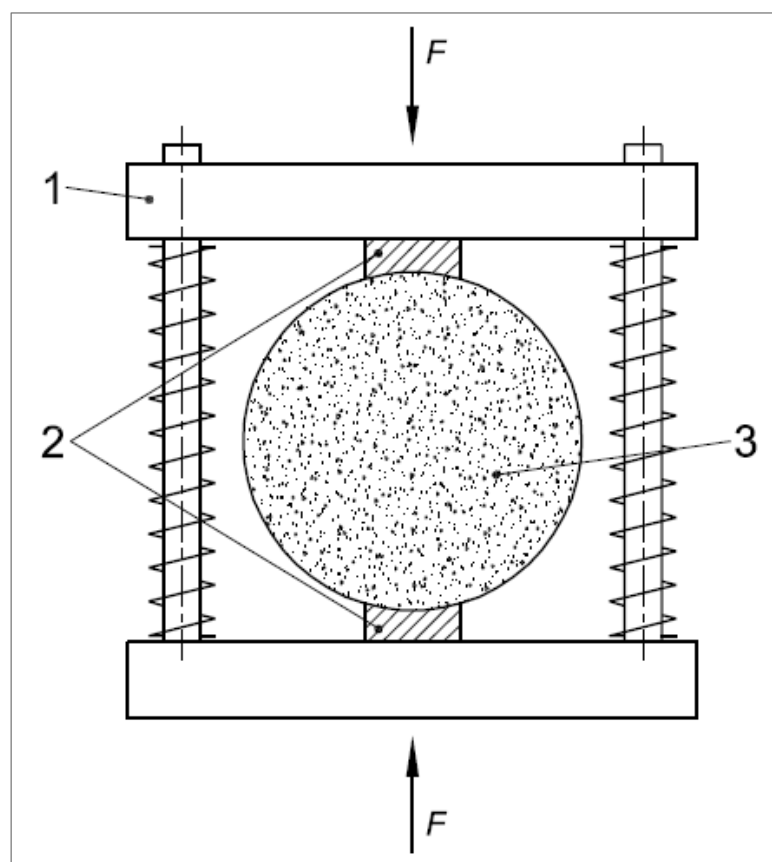


Figura 5.38: Schema di carico. (1) telaio di prova. (2) coltelli di carico. (3) provino.

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 tale procedura, i coltelli di carico presentano una superficie concava con raggio di curvatura corrispondente a quello nominale del provino.

Come previsto dal protocollo di prova, si applica un carico di compressione con una velocità costante di deformazione di 50 ± 2 mm/min, fino al raggiungimento della condizione di rottura. Noto il carico di rottura, o carico di compressione massimo misurato durante la prova, il valore della resistenza a trazione indiretta ITS si determina tramite la seguente relazione:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (5.4)$$

dove

ITS = resistenza o tensione di rottura a trazione indiretta (GPa);

P = massimo carico assiale di compressione registrato (kN);

D = diametro del provino (mm);

H = altezza del provino o spessore (mm).

Nel presente studio, per la determinazione della resistenza ITS è stata utilizzata una pressa statica computerizzata, prodotta dalla Società "Galdabini", con capacità di carico di 100 kN, configurata con tutti i dispositivi necessari per l'esecuzione della prova a trazione indiretta, come previsto dalla normativa (Figura 5.39).

L'unità di acquisizione dati registra i valori del carico di compressione (kN) applicato durante la prova e lo spostamento verticale corrispondente (mm). Tali dati, mediante l'equazione (5.4), consentono la realizzazione della curva di risposta tensione-spostamento e la determinazione della resistenza ITS (condizione di

rottura) in corrispondenza del valore di picco di tale curva.



Figura 5.39: Pressa per prove a trazione indiretta.

L'andamento tipico della curva tensione-spostamento presenta una fase iniziale crescente, più o meno accentuata in relazione alle caratteristiche di resistenza del provino, un punto di picco corrispondente allo stato di rottura e una fase finale decrescente in cui il materiale può mostrare risorse residue di resistenza. A titolo di esempio, si riportano di seguito le curve tensione-spostamento per un provino con polverino tradizionale TCR (3.0% cemento, 3.5% emulsione) e per l'equivalente provino con polverino criogenico CCR (Figura 5.40 e Figura 5.41).

Il confronto completo tra i risultati di prova della diverse miscele è affrontato nel dettaglio nei paragrafi successivi.

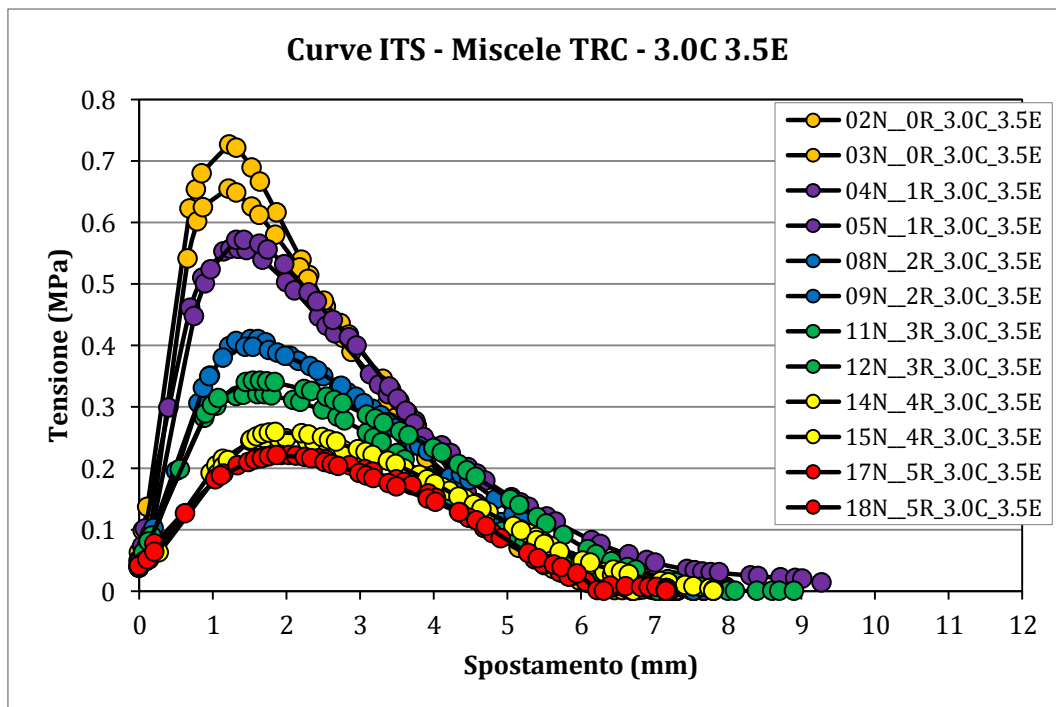


Figura 5.40: Curve tensione-spostamento. 3.5% emulsione, 3.0% cemento, polverino TCR.

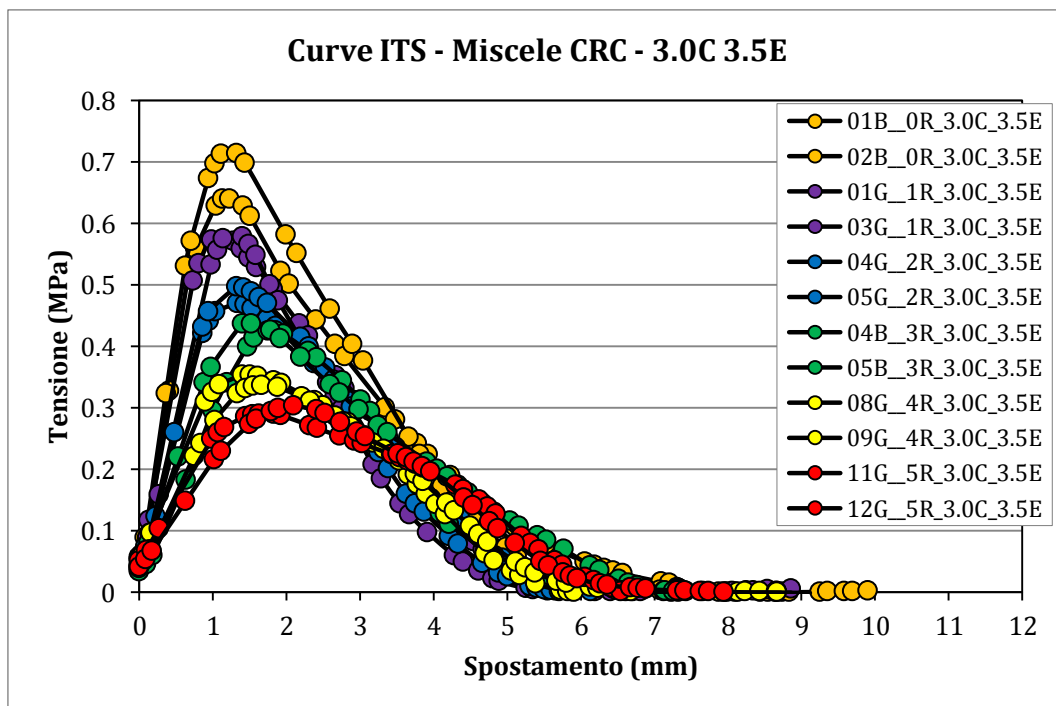


Figura 5.41: Curve tensione-spostamento. 3.5% emulsione, 3.0% cemento, polverino CCR.

5.3.2 TENSIONI MASSIME E SPOSTAMENTI A ROTTURA

L'analisi comparativa tra i risultati di prova di tutti i campioni è effettuata sui valori di resistenza (o massima tensione) a trazione indiretta ITS ed il corrispondente spostamento registrato. I dati sono riassunti in grafici nei quali le tensioni ITS e gli spostamenti a rottura sono riportati in ordinata, rispettivamente sull'asse di sinistra e su quello di destra, mentre in ascissa sono presenti le diverse percentuali di polverino CR%.

La Figura 5.42 e la Figura 5.43 si riferiscono ai provini contenenti cemento in tenore del 3.0%, emulsione di bitume in tenore del 3.5% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR, comprese tra 0% e 5%.

La Figura 5.44 e la Figura 5.45 si riferiscono ai provini contenenti cemento in tenore del 1.5%, emulsione di bitume in tenore del 3.5% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR, comprese tra 0% e 5%.

La Figura 5.46 e la Figura 5.47 si riferiscono ai provini contenenti cemento in tenore del 3.0%, emulsione di bitume in tenore del 5.0% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR, comprese tra 0% e 5%.

La Figura 5.48 e la Figura 5.49 si riferiscono ai provini contenenti cemento in tenore del 1.5%, emulsione di bitume in tenore del 5.0% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR, comprese tra 0% e 5%.

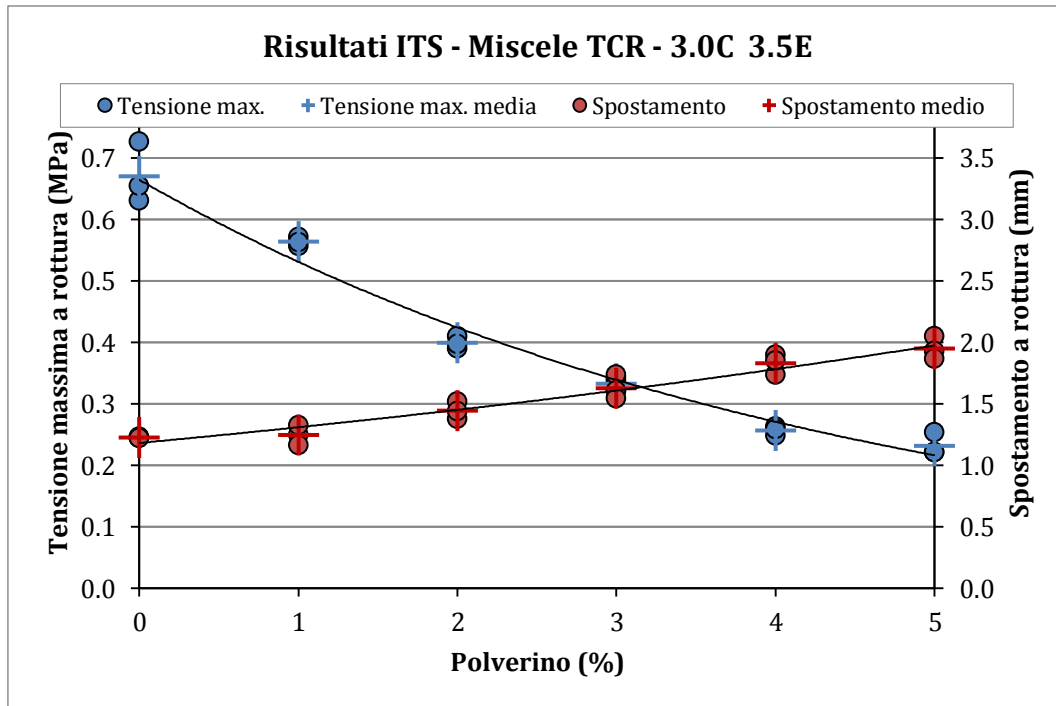


Figura 5.42: Tensione e spostamento a rottura. 3.5% emulsione, 3.0% cemento, polverino TCR.

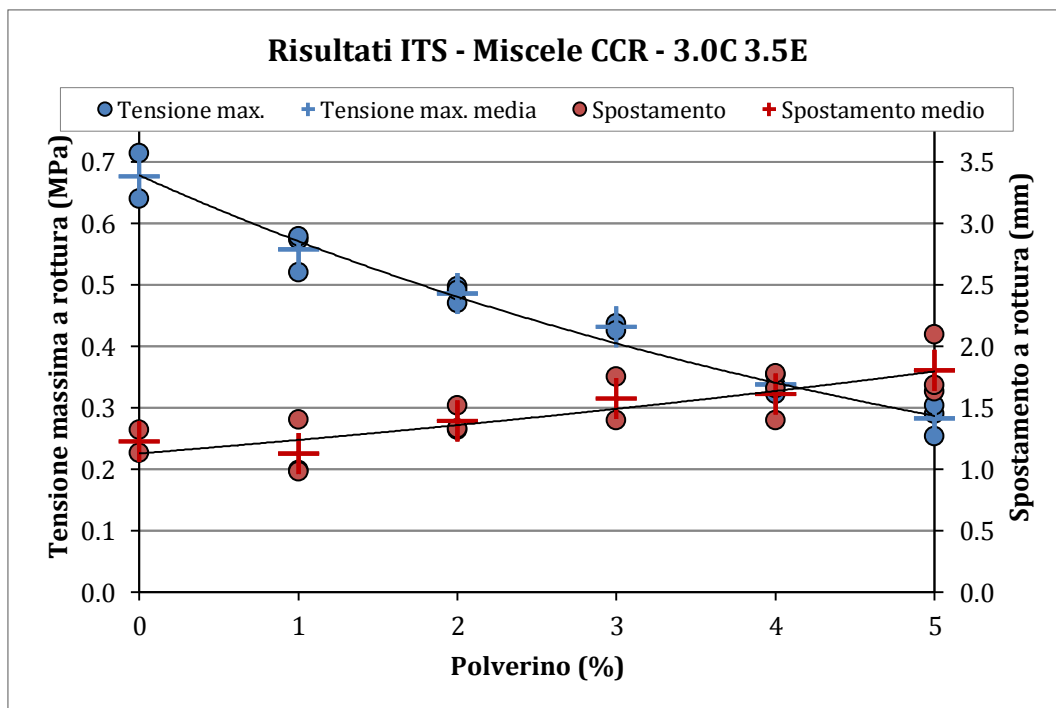


Figura 5.43: Tensione e spostamento a rottura. 3.5% emulsione, 3.0% cemento, polverino CCR.

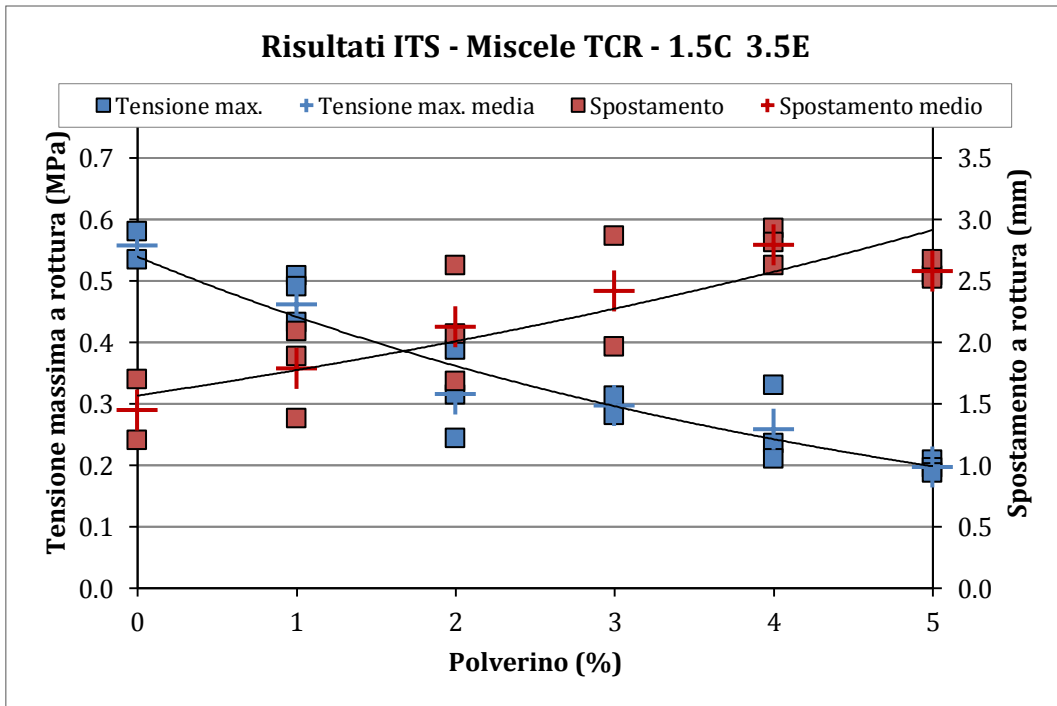


Figura 5.44: Tensione e spostamento a rottura. 3.5% emulsione, 1.5% cemento, polverino TCR.

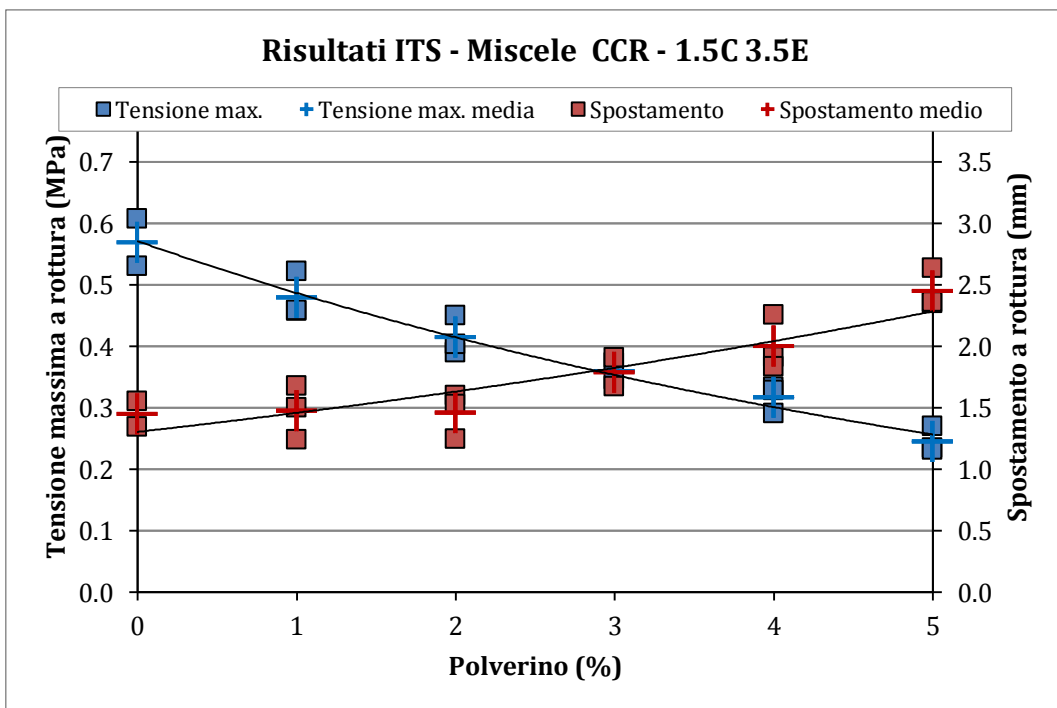


Figura 5.45: Tensione e spostamento a rottura. 3.5% emulsione, 1.5% cemento, polverino CCR.

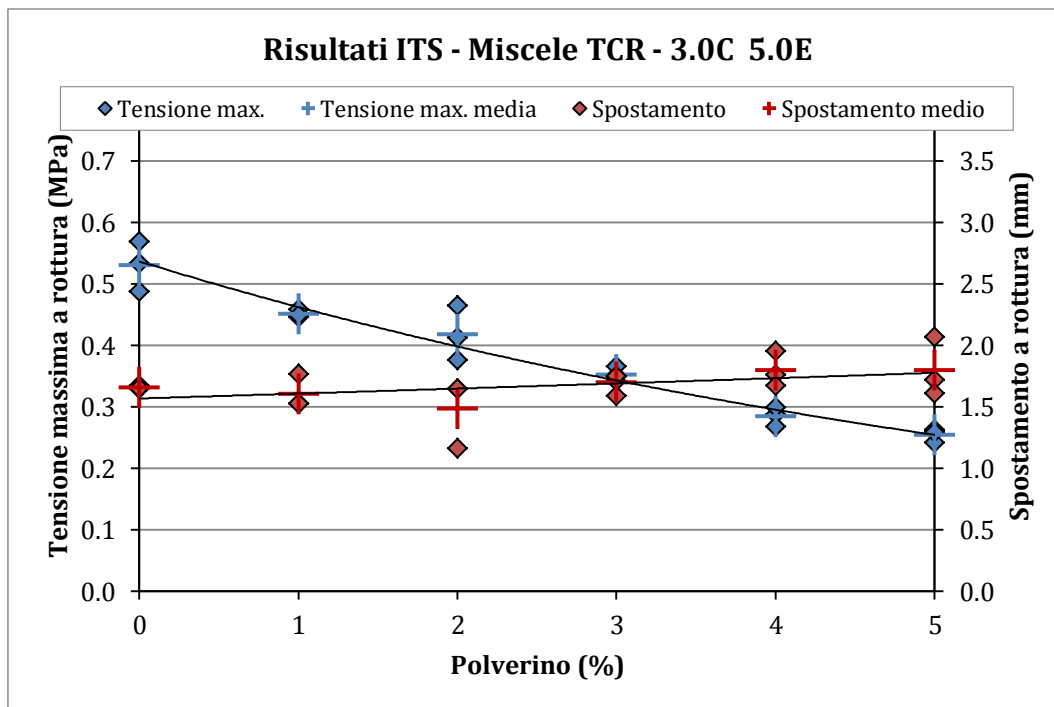


Figura 5.46: Tensione e spostamento a rottura. 5.0% emulsione, 3.0% cemento, polverino TCR.

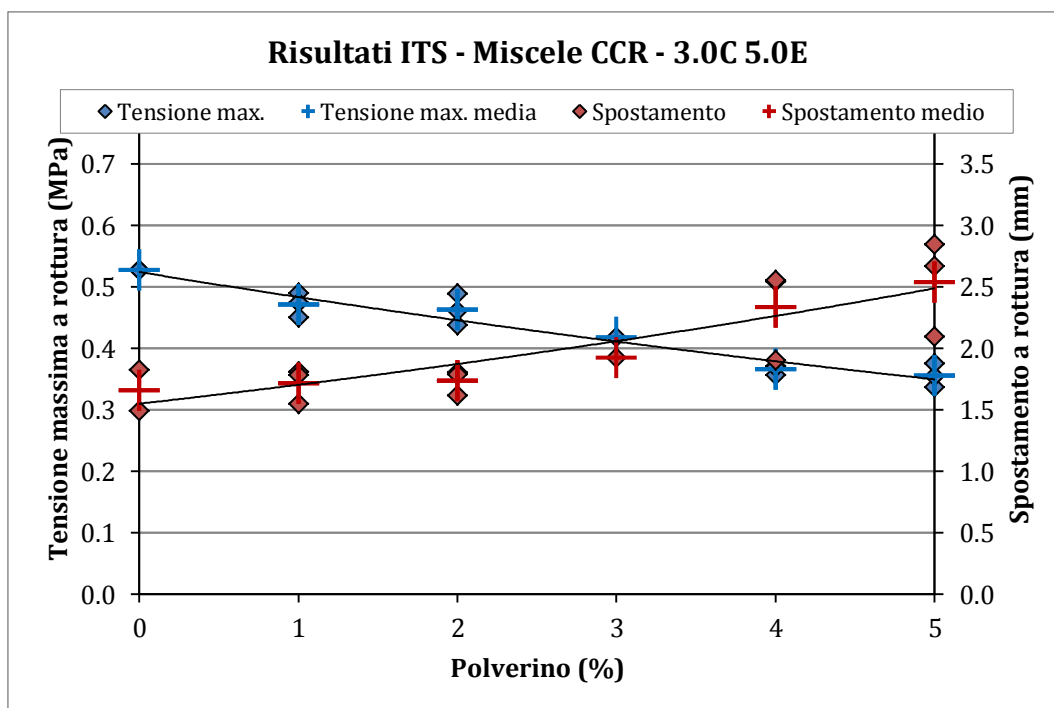


Figura 5.47: Tensione e spostamento a rottura. 5.0% emulsione, 3.0% cemento, polverino CCR.

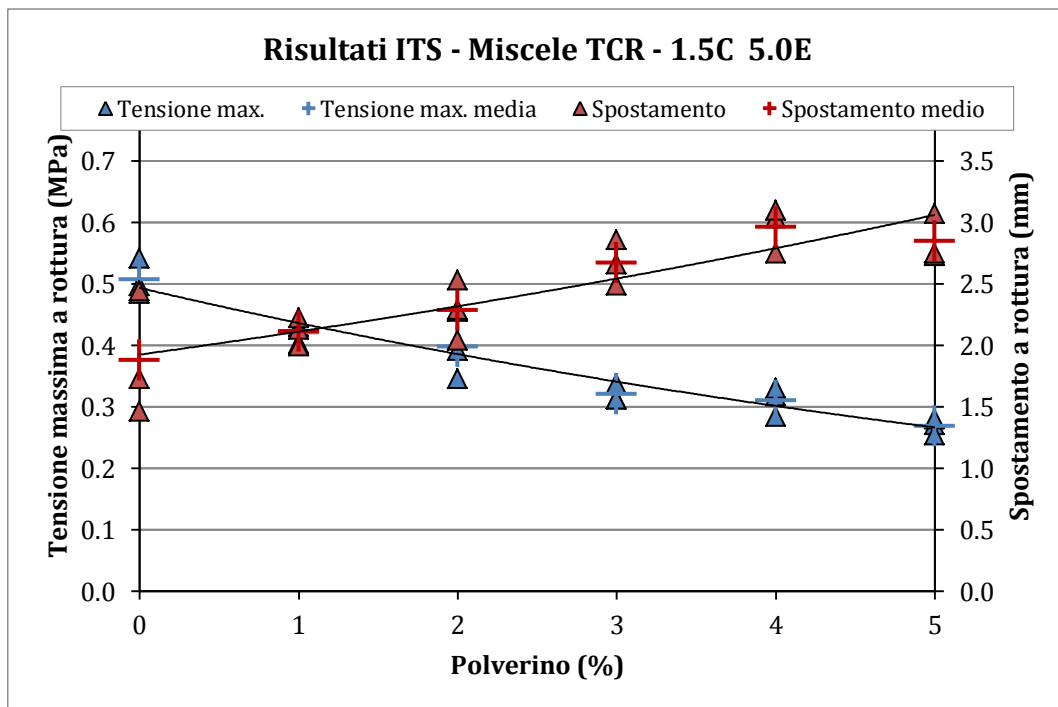


Figura 5.48: Tensione e spostamento a rottura. 5.0% emulsione, 1.5% cemento, polverino TCR.

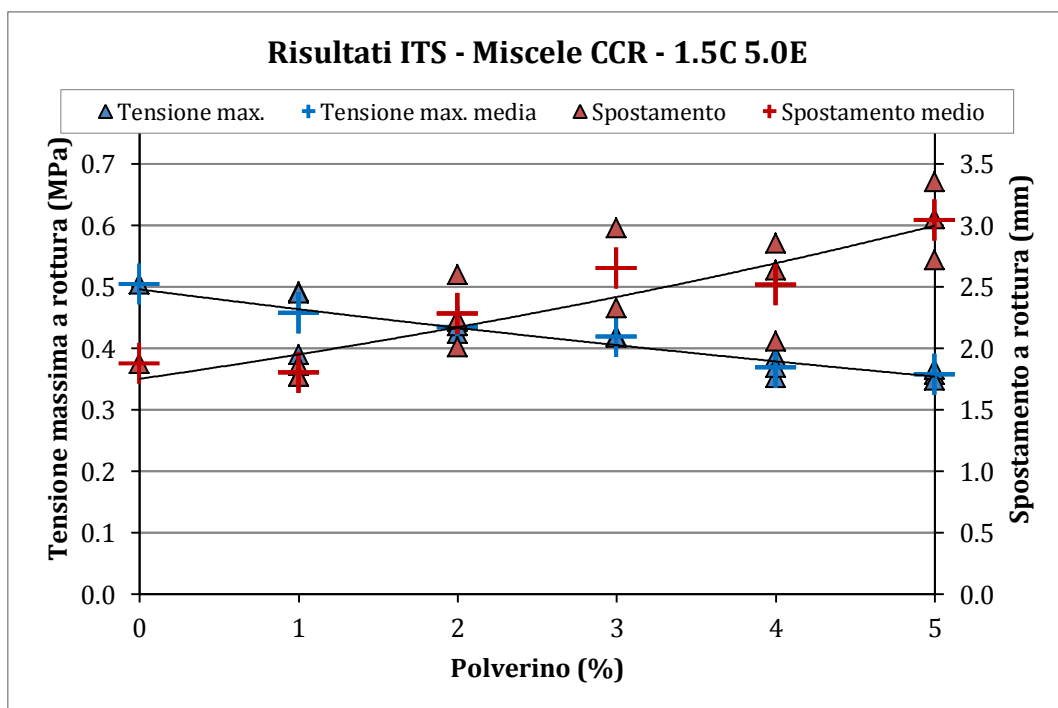


Figura 5.49: Tensione e spostamento a rottura. 5.0% emulsione, 1.5% cemento, polverino CCR.

I valori medi delle resistenze ITS e degli spostamenti a rottura sono riportati nelle seguenti tabelle: polverino tradizionale TCR in Tabella 5.12 e polverino criogenico CCR in Tabella 5.13.

TCR %	3.0C_3.5E		3.0C_5.0E		1.5C_3.5E		1.5C_5.0E	
	ITS (MPa)	Spos. (mm)	ITS (MPa)	Spos. (mm)	ITS (MPa)	Spos. (mm)	ITS (MPa)	Spos. (mm)
0	0.67	1.22	0.53	1.66	0.56	1.45	0.51	1.88
1	0.56	1.25	0.45	1.61	0.46	1.79	0.42	2.12
2	0.40	1.44	0.42	1.49	0.32	2.13	0.40	2.29
3	0.33	1.63	0.35	1.70	0.30	2.42	0.32	2.67
4	0.26	1.83	0.28	1.80	0.26	2.79	0.31	2.96
5	0.23	1.95	0.25	1.80	0.20	2.58	0.27	2.85

Tabella 5.12: Tensioni e spostamenti medi a rottura. Polverino tradizionale TCR.

CCR %	3.0C_3.5E		3.0C_5.0E		1.5C_3.5E		1.5C_5.0E	
	ITS (MPa)	Spos. (mm)	ITS (MPa)	Spos. (mm)	ITS (MPa)	Spos. (mm)	ITS (MPa)	Spos. (mm)
0	0.67	1.23	0.53	1.66	0.56	1.45	0.51	1.88
1	0.56	1.12	0.47	1.71	0.48	1.47	0.46	1.80
2	0.49	1.39	0.46	1.74	0.41	1.46	0.44	2.28
3	0.43	1.57	0.42	1.92	0.37	1.79	0.42	2.65
4	0.34	1.61	0.36	2.33	0.32	2.00	0.37	2.52
5	0.28	1.80	0.36	2.54	0.25	2.45	0.36	3.04

Tabella 5.13: Tensioni e spostamenti medi a rottura. Polverino criogenico CCR.

Dai grafici e dai dati risulta evidente che con l'aumento della percentuale di polverino utilizzata si verifica un decremento delle resistenze a trazione indiretta ITS e un aumento dei valori di spostamento in corrispondenza della rottura. Per ciascuna

tipologia di miscela, infatti, i campioni che presentano resistenze di picco maggiori sono quelli che non contengono polverino (CR 0%); tale trend si conferma indipendentemente dalla tipologia di quello utilizzato.

Per quanto riguarda l'influenza del dosaggio di cemento sui risultati, come è logico attendersi, un contenuto maggiore conferisce alla miscela maggiore rigidità che si traduce in valori di ITS superiori e di spostamento a rottura inferiori. Tale comportamento è confermato per tutte le miscele, a parità di tenore di emulsione bituminosa ed con il variare delle percentuali di CR.

Il ruolo dell'emulsione bituminosa è quello di conferire al provino un comportamento più duttile. Se si analizzano le miscele senza polverino (CR 0%) e a parità di cemento, si nota che un aumento di emulsione genera una riduzione della resistenza a rottura e dello spostamento corrispondente. Ciò implica che l'azione di irrigidimento operata dal cemento sia mitigata dall'azione dell'emulsione che, pur riducendo lo sforzo tagliente necessario alla rottura, comporta un incremento delle corse a rottura e restituisce curve di prova più duttili. Se si analizzano, invece, le miscele a parità di cemento e con polverino di gomma, si nota che, all'aumento dell'emulsione, il calo relativo di ITS che si verifica per l'incremento del tenore di CR% tende ad essere inferiore. In particolare, già in corrispondenza di percentuali di CR di 2%, si registrano valori di ITS leggermente superiori per i provini più ricchi di emulsione. Si ritiene che tale comportamento sia da associare all'interazione tra l'effetto legante ed adesivo dell'emulsione e l'elasticità del polverino di gomma, che tende ad accentuarsi quando le quantità in gioco aumentano. Le minori pendenze delle curve di tendenza dimostrano tale fenomeno. Lo stesso trend non si ripete per gli spostamenti a rottura dove in genere, ad un aumento di emulsione e di cemento,

corrispondono corse più elevate.

Al confronto specifico dei risultati di prova tra il polverino tradizionale TCR e quello criogenico CCR è dedicato il paragrafo successivo.

5.3.3 CONFRONTO DEI POLVERINI TRADIZIONALE E CRIOGENICO

Per facilitare l'analisi comparativa dei risultati nella Tabella 5.14 e Tabella 5.15 sono calcolati i valori medi delle tensioni e degli spostamenti a rottura, "normalizzati" per ciascuna miscela, ossia rapportati ai corrispondenti valori dei provini senza polverino di gomma.

I grafici di confronto per ciascuna miscela sono rappresentati dalla Figura 5.50 alla Figura 5.53. I dati normalizzati delle tensioni ITS (linea continua) e degli spostamenti a rottura (linea tratteggiata) sono riportati in ordinata, rispettivamente sull'asse di sinistra e su quello di destra, mentre in ascissa sono presenti le diverse percentuali di polverino CR%. I risultati dei provini con polverino di gomma tradizionale TCR sono riportati in rosso, i risultati con quello criogenico CCR sono riportati in blu.

La Figura 5.50 si riferisce ai provini contenenti cemento in tenore del 3.0%, emulsione di bitume in tenore del 3.5% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR, comprese tra 0% e 5%.

La Figura 5.51 si riferisce ai provini contenenti cemento in tenore del 1.5%, emulsione di bitume in tenore del 3.5% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR, comprese tra 0% e 5%.

La Figura 5.52 si riferisce ai provini contenenti cemento in tenore del 3.0%,

emulsione di bitume in tenore del 5.0% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR, comprese tra 0% e 5%.

La Figura 5.53 si riferisce ai provini contenenti cemento in tenore del 1.5%, emulsione di bitume in tenore del 5.0% e, rispettivamente, percentuali variabili di polverino tradizionale TCR e criogenico CCR, comprese tra 0% e 5%.

TCR %	3.0C_3.5E		3.0C_5.0E		1.5C_3.5E		1.5C_5.0E	
	ITS %	Spost. %	ITS %	Spost. %	ITS %	Spost. %	ITS %	Spost. %
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	0.84	1.02	0.85	0.97	0.83	1.23	0.83	1.13
2	0.60	1.18	0.79	0.90	0.57	1.47	0.78	1.22
3	0.50	1.33	0.66	1.02	0.53	1.92	0.63	1.42
4	0.38	1.49	0.54	1.08	0.46	2.27	0.61	1.72
5	0.35	1.59	0.48	1.09	0.35	1.78	0.53	1.52

Tabella 5.14: Tensioni e spostamenti medi normalizzati. Polverino tradizionale TCR.

CCR %	3.0C_3.5E		3.0C_5.0E		1.5C_3.5E		1.5C_5.0E	
	ITS %	Spost. %	ITS %	Spost. %	ITS %	Spost. %	ITS %	Spost. %
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	0.84	0.92	0.89	1.03	0.85	1.02	0.90	0.96
2	0.73	1.13	0.88	1.05	0.74	1.00	0.85	1.22
3	0.65	1.28	0.80	1.16	0.65	1.23	0.82	1.41
4	0.51	1.31	0.68	1.41	0.56	1.38	0.72	1.34
5	0.42	1.47	0.67	1.53	0.44	1.69	0.70	1.62

Tabella 5.15: Tensioni e spostamenti medi normalizzati. Polverino criogenico CCR.

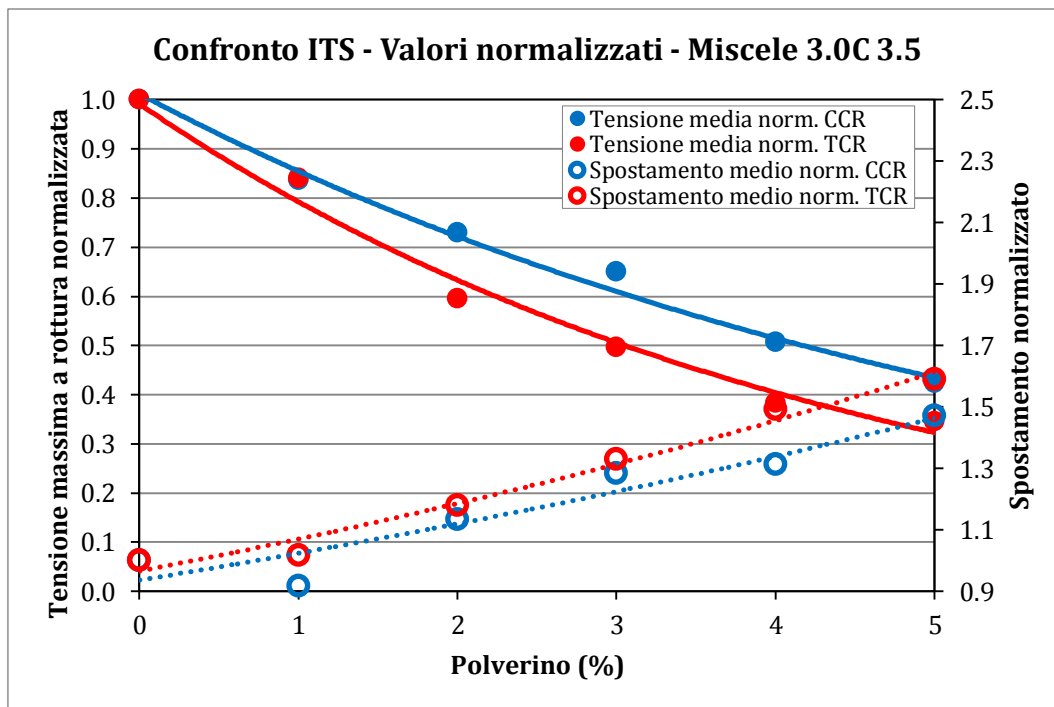


Figura 5.50: Confronto valori normalizzati. 3.5% emulsione, 3.0% cemento, polverino TCR-CCR.

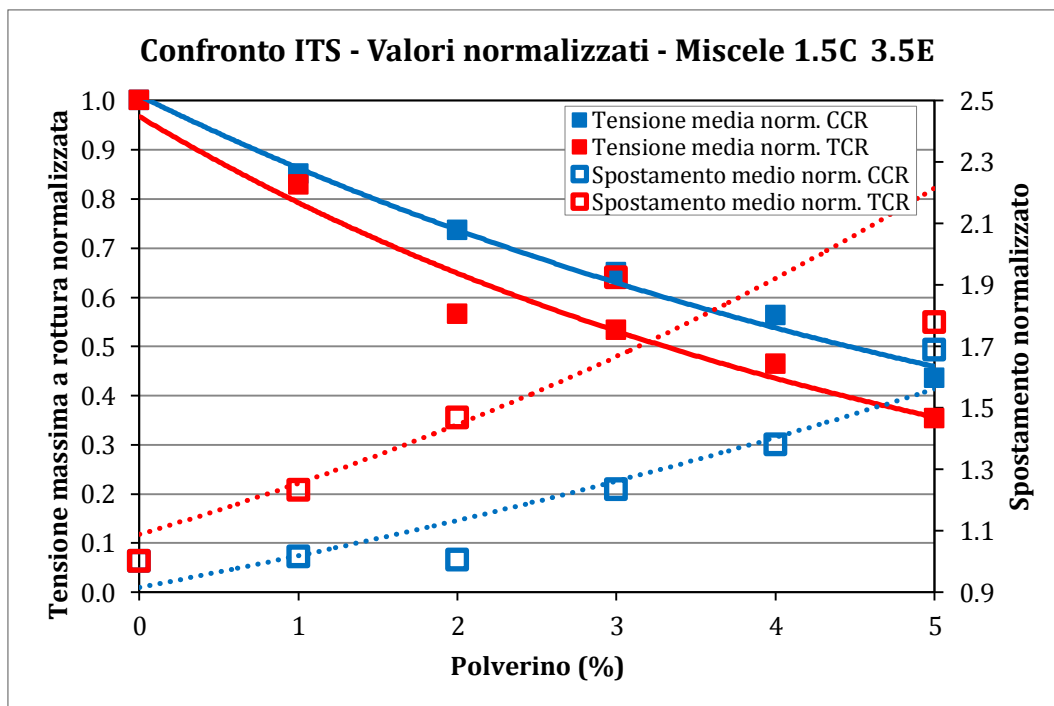


Figura 5.51: Confronto valori normalizzati. 3.5% emulsione, 1.5% cemento, polverino TCR-CCR.

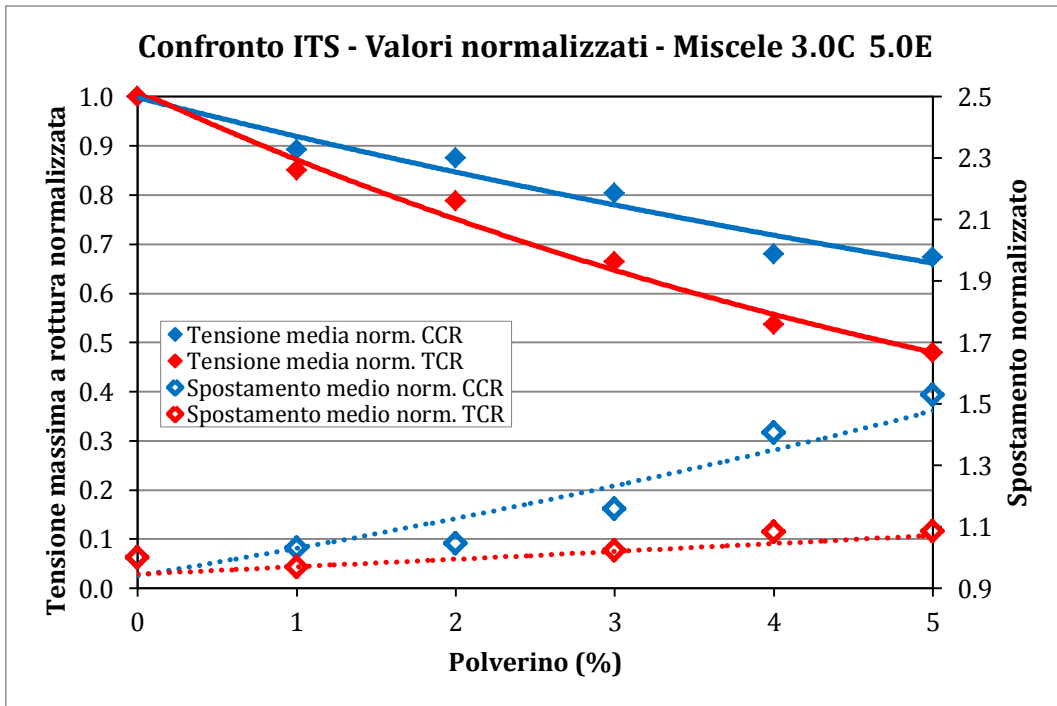


Figura 5.52: Confronto valori normalizzati. 5.0% emulsione, 3.0% cemento, polverino TCR-CCR.

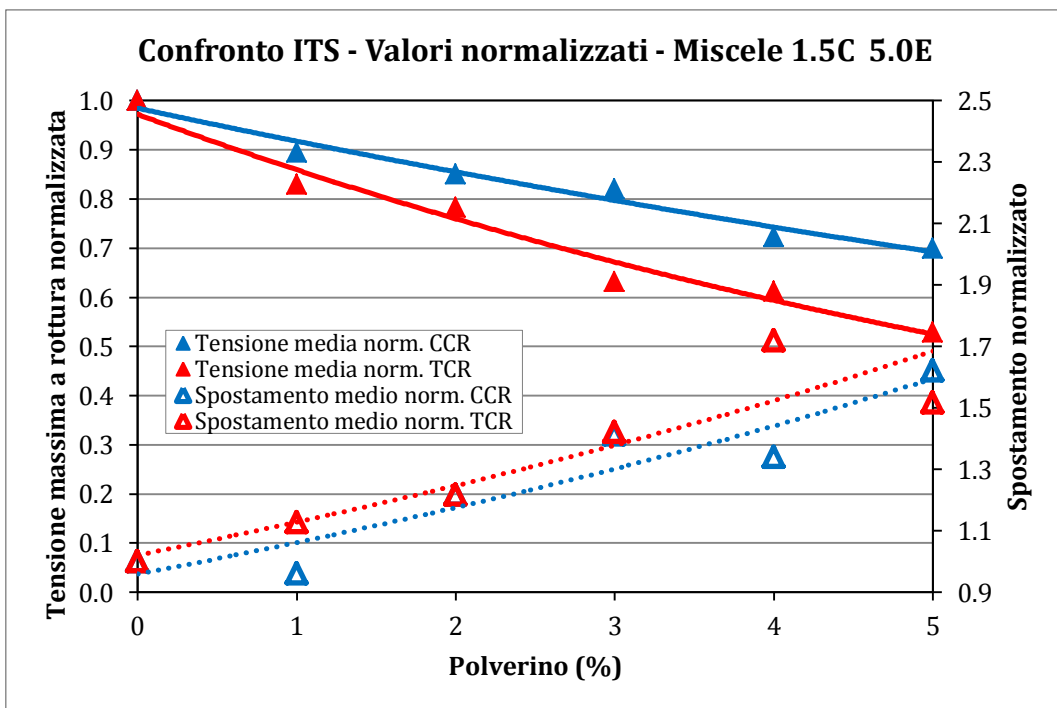


Figura 5.53: Confronto valori normalizzati. 5.0% emulsione, 1.5% cemento, polverino TCR-CCR.

Dall'analisi dei risultati si deduce la diversa influenza che le due tipologie di polverino hanno sul comportamento dei provini. Partendo dall'analisi delle miscele con il 3.5% di emulsione bituminosa e 1.5% di cemento, si nota come i campioni contenenti polverino tradizionale TCR abbiano una resistenza ITS minore rispetto ai rispettivi provini in cui si è usato polverino criogenico CCR, indipendentemente dalla percentuale di gomma contenuta. Con riferimento alla miscela senza CR, i valori ITS TCR sono indicativamente inferiori di circa il 10% rispetto ai corrispondenti CCR. In termini di spostamenti percentuali a rottura, i valori per il polverino CCR sono sempre inferiori.

Con l'aumento del tenore di cemento (3.0%), si è già evidenziato in precedenza l'aumento della rigidità del materiale, ossia un incremento della resistenza ITS. A livello di comparazione tra polverini anche in questo caso è confermato il trend rilevato nelle osservazioni precedenti, secondo le quali i risultati migliori si ottengono con il polverino CCR, a prescindere dalla sua percentuale di applicazione. In aggiunta, più s'incrementa il contenuto di polverino più la differenza relativa tra le due tipologie tende ad accentuarsi. Anche per questa tipologia di miscele si conferma che l'aumento percentuale degli spostamenti a rottura è superiore per il polverino TCR rispetto a quello CCR.

Analizzando i risultati di prova per le miscele con il 5.0% di emulsione bituminosa, se da un lato si conferma lo stesso trend migliorativo del CCR rispetto al TCR esaminato in precedenza, dall'altro si nota che all'aumentare del quantitativo di polverino il decremento percentuale dei valori ITS risulta meno attenuato; le miscele più ricche di emulsione presentano una linea di tendenza con inclinazione più lieve e un andamento pressoché lineare. L'aggiunta di cemento dal tenore di 1.5% a 3.0%

non comporta sensibili differenze di comportamento per la resistenza ITS; in entrambe le situazioni il decremento massimo, rispetto a ciascun riferimento, per il polverino CCR è intorno a 30% (CCR 5%), mentre per il polverino TCR intorno a 50% (TCR 5%).

Gli spostamenti a rottura registrati per le miscele ricche di emulsione bituminosa hanno un andamento crescente, come osservato anche per le altre, con valori di incremento massimo per il polverino CCR (5%) che si attestano intorno a 150%-160% di quello di riferimento. Gli analoghi valori per il tradizionale TCR hanno un andamento statisticamente meno lineare e presentano una singolarità soprattutto per i provini con 3.0% di cemento.

CAPITOLO 6:

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DINAMICA

6.1 CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI

6.1.1 MISCELAZIONE, COMPATTAZIONE E MATURAZIONE

Per la Fase 3 di caratterizzazione meccanica dinamica, così come descritto al paragrafo 4.2.1, sono stati realizzati un totale di 96 provini cilindrici, suddivisi in miscele senza polverino CR0%, con polverino di gomma tradizionale TCR e con quello criogenico CCR. La Tabella 6.1 riassume schematicamente il totale dei campioni confezionati, suddivisi nelle diverse tipologie di miscele.

In questa Fase 3, sono stati preparati, maturati e testate solamente provini contenenti il 3% di polverino di gomma, tradizionale e criogenico, e confrontati poi con gli equivalenti senza polverino. Sulla base dell'analisi di prequalifica, la scelta di tale tenore come riferimento limite superiore rappresenta un buon compromesso tra caratteristiche volumetriche, lavorabilità, resistenza meccanica ed anche aspetti economici, soprattutto in relazione al costo del polverino di gomma criogenico CCR.

CEMENTO	EMULSIONE	NO CR	N°	TCR	N°	CCR	N°
%	%	%	Provini	%	Provini	%	Provini
1.5	3.5	0	8				
				3	8	3	8
1.5	5.0	0	8				
				3	8	3	8
3.0	3.5	0	8				
				3	8	3	8
3.0	5.0	0	8				
				3	8	3	8
		NO CR	32	TCR	32	CCR	32

Tabella 6.1: Numero provini per la caratterizzazione meccanica dinamica.

Le procedure operative per le attività di miscelazione, compattazione e maturazione sono state le medesime utilizzate in fase di prequalifica, in accordo con quanto descritto nei paragrafi 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3.

6.1.2 TAGLIO

Ciascun campione al termine della maturazione è stato sottoposto ad un'operazione di taglio mediante mola circolare (Figura 6.1); ciò ha permesso di ottenere dallo stesso campione due provini che fossero di dimensioni conformi a quelle specificate dalle normative di riferimento per la caratterizzazione dinamica:

- *EN 12697-26*: Miscele bituminose, metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo. Parte 26: Rigidezza (annesso C).
- *EN 12697-24*: Miscele bituminose, metodi di prova per conglomerati

bituminosi a caldo. Parte 24: Resistenza alla fatica (annesso E).

In particolare, la norma per lo studio della resistenza a fatica stabilisce che, per miscele con aggregato di dimensione massima di 38 mm, i provini da sottoporre a test in configurazione di trazione indiretta debbano avere un diametro di 150 mm e un'altezza minima di 60 mm; per miscele con aggregato di dimensione massima 25 mm, i provini debbano avere un diametro di 100 mm e un'altezza minima di 40 mm.

I provini sottoposti alle prove di caratterizzazione dinamica a fatica ITFT sono gli stessi sui quali precedentemente è stato determinato il modulo di rigidità ITSM. Quest'ultimo test prevede che le dimensioni dei campioni sia compresa nell'intervallo tra 30 mm e 75 mm, quindi sia compatibile con le dimensioni descritte sopra.



Figura 6.1: Taglio dei provini mediante mola circolare.

Da osservare che i provini, prima di essere sottoposti a taglio, sono stati preventivamente avvolti in uno strato di nastro isolante in corrispondenza della zona di lavorazione. Questo accorgimento ha permesso di ottenere un taglio più pulito ed

evitare che parte degli aggregati superficiali potesse essere rimossa dal provino, compromettendone l'integrità e la forma (Figura 6.2).

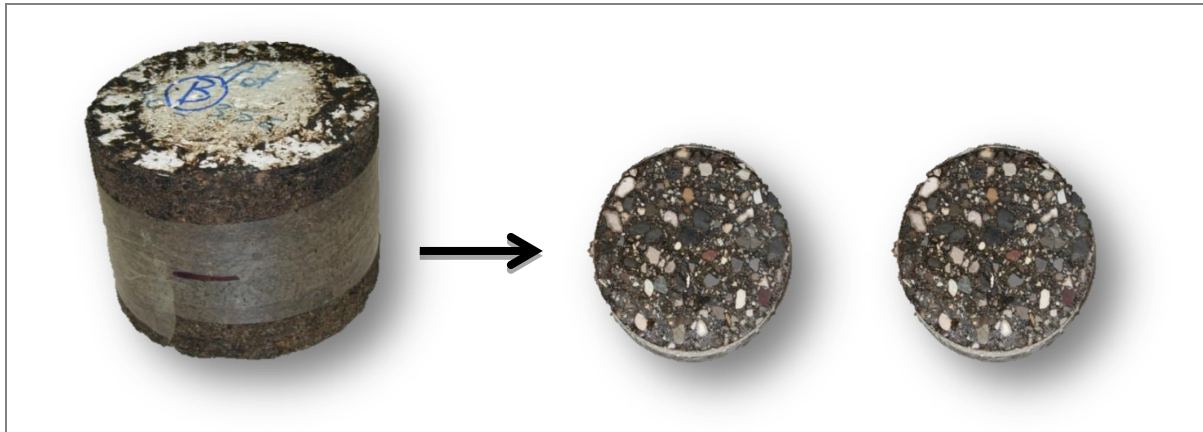


Figura 6.2: Esempio di un provino, prima e dopo l'operazione di taglio.

I provini di caratterizzazione dinamica per ciascuna tipologia di miscela sono risultati essere 16, per un totale complessivo di 192.

6.2 PROVA DI MODULO RIGIDEZZA ITSM

6.2.1 DEFINIZIONE E TEORIA

Nella fase di progettazione di una sovrastruttura, come per ogni opera di carattere ingegneristico, bisogna sempre tener conto dei carichi applicati che influenzano il comportamento dei materiali e quindi conoscere le caratteristiche meccaniche degli strati che costituiscono il pacchetto stradale, dal sottofondo fino alla superficie.

Le azioni di sollecitazione applicate in esercizio ai materiali stradali sono dovute

al traffico veicolare ed in particolare si distinguono in due tipologie: 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 dalla combinazione dei due tipi di mezzi di trasporto. In aggiunta, oltre alla variabilità dei carichi e della loro velocità di applicazione, si deve tenere conto anche delle diverse condizioni ambientali.

Il carico applicato ad un pacchetto bituminoso da uno pneumatico può essere schematizzato con una forza concentrata che provoca l'instaurarsi di una zona di compressione, immediatamente inferiore e di due zone di trazione nelle parti adiacenti a quest'area. Inoltre, per la connessione all'interfaccia tra gli strati, le tensioni tangenziali che si creano all'estradosso dello strato superficiale sono contrarie a quelle che si verificano all'intradosso. Schematizzando una porzione di pavimentazione tramite elementi infinitesimi di volume, gli stati tensionali esercitati su di essi sono quelli rappresentati in Figura 6.3.

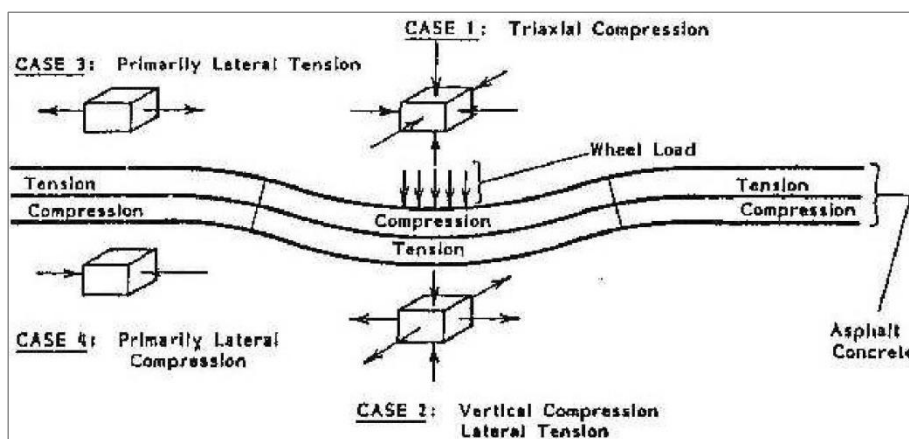


Figura 6.3: Stati tensionali della pavimentazione per l'applicazione di un carico concentrato.

Lo studio effettuato in laboratorio deve servire a simulare lo stato tensionale e deformativo del materiale in sito. Per questo è necessario sottoporre i campioni rappresentativi a sollecitazioni di tipo dinamico che abbiano caratteristiche di ampiezza, frequenza e forma d'onda opportunamente calibrate, allo scopo di dedurre le leggi di comportamento necessarie al calcolo della pavimentazione.

Come intuibile, è estremamente difficile realizzare un unico test che induca nel provino la molteplicità di stati tensionali che si verificano nella realtà. Ciononostante, grazie alle ricerche effettuate e alla progettazione di apparecchiature innovative, è ora possibile analizzare gli stati tensionali e deformativi del materiale in condizioni di prova che riproducano sempre più fedelmente le condizioni reali.

La legge costitutiva di un materiale che pone in correlazione tensione e deformazione è caratterizzata da un indice, detto *Modulo*. Nei materiali elastici, per i quali la legge costitutiva è calcolabile in modo univoco, si parla di *Modulo Elastico*, o *Modulo di Young*; nei materiali viscoelastici, come quelli legati a bitume, la relazione tra stato tensionale e deformativo non è definibile in maniera univoca poiché dipende dal tipo, ma anche dalle condizioni di prova: modalità di applicazione del carico, frequenza, temperatura di esecuzione del test, dimensione e forma del provino.

In quest'ultimo caso il legame tra sollecitazione e reazione è stabilito da un *Modulo* definito *Complesso*. Esso è un numero complesso costituito da una parte reale, che riproduce la risposta elastica del materiale, fornendo quindi una misura del lavoro reversibile compiuto sotto l'azione di un carico e da una parte immaginaria che esprime la componente viscosa, responsabile della frazione di lavoro irreversibile dissipata durante la sollecitazione. A causa della natura viscoelastica del materiale, il valore del modulo dipende dalla temperatura e dalla frequenza di carico; per questo

motivo le prove eseguite per la sua determinazione vengono ripetute variando questi due fattori.

Il modulo complesso è definito secondo la formula:

$$E^* = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_0 \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\varphi} = |E^*| e^{i\varphi} \quad (6.1)$$

dove

$|E^*|$ = valore assoluto del modulo complesso;

σ_0 = massima tensione;

ε_0 = massima deformazione;

$\omega = 2\pi f$, pulsazione di carico;

f = frequenza di carico;

φ = angolo di fase.

L'angolo di fase φ esprime il ritardo temporale che intercorre tra l'applicazione della sollecitazione e il manifestarsi della conseguente deformazione, fenomeno che dipende dalla natura viscoelastica del materiale.

Dall'equazione (6.1) il modulo può essere espresso anche come:

$$E^* = |E^*|(\cos \varphi + i \sin \varphi) = E_1 + iE_2 \quad (6.2)$$

dove

$$E_1 = |E^*| \cos \varphi \quad (6.3)$$

$$E_2 = |E^*| \sin \varphi$$

rappresentano rispettivamente la parte reale (E_1) e la parte immaginaria (E_2) del modulo.

Il modulo suddetto si può quindi rappresentare sul piano complesso tramite le due componenti E_1 e E_2 , come in Figura 6.4.

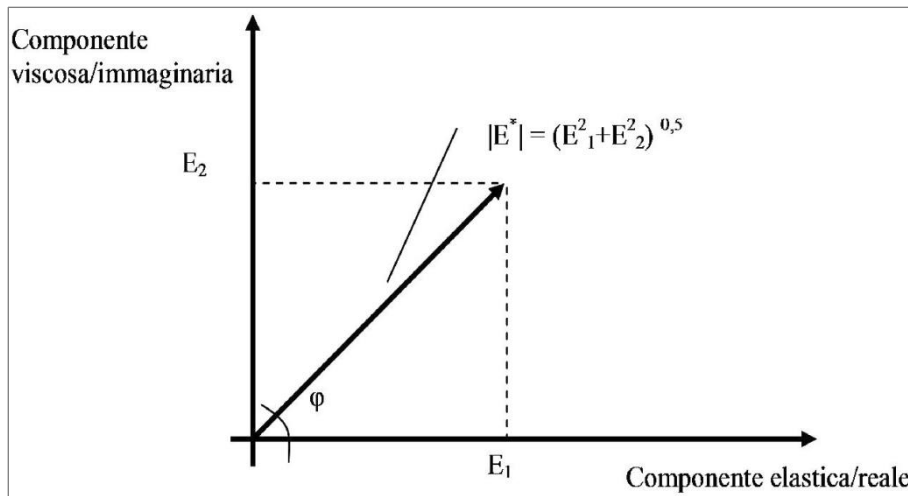


Figura 6.4: Rappresentazione del Modulo Complesso tramite parte reale e immaginaria.

Il valore assoluto del modulo complesso e l'angolo di sfasamento possono essere calcolati tramite le relazioni seguenti:

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \tag{6.4}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$$

La prima delle equazioni (6.4) definisce il *Modulo di Rigidezza* o *Modulo Elastico* del conglomerato bituminoso, ossia il valore assoluto del modulo complesso. Tale modulo, a differenza dei materiali per i quali si ammette la validità della legge di Hooke, tiene in considerazione le caratteristiche viscoso tipiche di quelli legati a bitume.

Con riferimento alla sovrastruttura stradale, il modulo di rigidezza è direttamente legato alla capacità dei materiali della pavimentazione di deformarsi sotto carichi applicati; in particolare, in funzione del legame presente tra gli strati, il modulo di rigidezza rappresenta la capacità di diffondere le deformazioni all'interno

del pacchetto stradale e quindi di assorbire le azioni del traffico veicolare. Si desume come siano di rilevante importanza il corretto dimensionamento degli strati da sovrapporre, la posa in opera e la compattazione. In generale si può considerare che, a parità di modalità di posa, condizioni ambientali esterne e tipo di carico applicato, una pavimentazione caratterizzata da un alto modulo di rigidità trasferisca sul sottofondo i carichi di compressione su un'area più ampia e con un'intensità minore rispetto ad una pavimentazione caratterizzata da un basso modulo di rigidità.

Dalla Figura 6.5 è evidente come la pavimentazione con un più basso modulo di rigidità generi, a causa di una distribuzione dei carichi su un'area di influenza minore, una compressione sul sottofondo più concentrata con un conseguente stato tensionale maggiore.

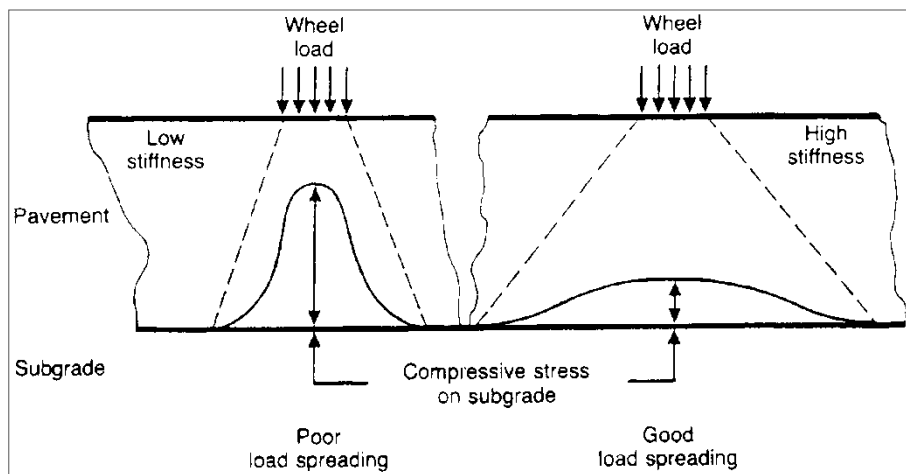


Figura 6.5: Distribuzione del carico in funzione del modulo di rigidità.

In linea di principio in una sovrastruttura caratterizzata da un basso modulo di rigidità gli sforzi di tensione tendono a concentrarsi in aree ristrette, causando fenomeni di ormaiamento in superficie o di fessurazioni e conducendo a rottura lo strato di sottofondo.

6.2.1.1 Modulo di rigidità ITSM

Le prove di laboratorio per la determinazione del modulo complesso e del modulo di rigidità sottopongono provini prismatici, trapezoidali o cilindrici a carichi ciclici di compressione, trazione o flessione, variabili nel tempo ed in genere con legge sinusoidale. Negli anni '70 in Gran Bretagna fu ideato un macchinario di prova in grado di applicare un carico dinamico, in configurazione di trazione indiretta, su provini di forma cilindrica e di calcolare direttamente il modulo di rigidità secondo una procedura notevolmente semplificata: il risultato della prova è definito *Indirect Tensile Stiffness Modulus* (ITSM).

Le specifiche del test sono state recepite dalla normativa europea EN 12697-26 (annesso C): Miscele bituminose, metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo. Parte 26: Rigidità.

La prova consiste nell'applicare un numero limitato di sollecitazioni di compressione impulsive lungo il diametro verticale di un provino cilindrico, tali da generare una deformazione elastica in direzione diametralmente ortogonale. L'impulso di carico simula lo stato tensionale e deformativo causato dal passaggio di una ruota.

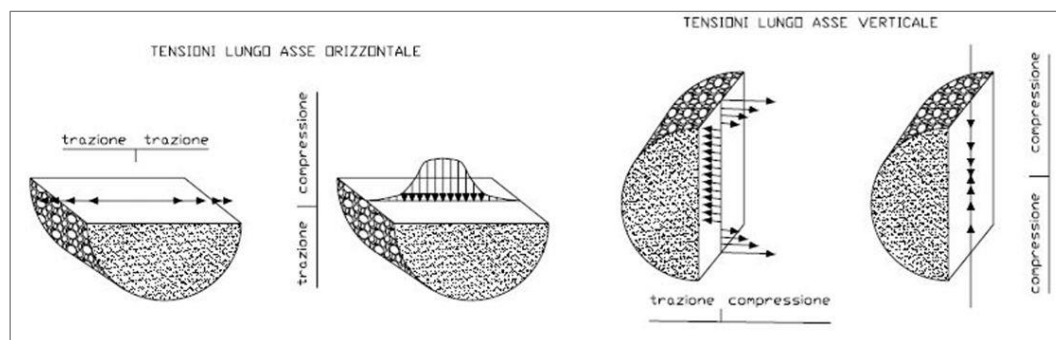


Figura 6.6: Andamento delle tensioni nel provino. Asse orizzontale e (sx), asse verticale (dx).

L'entità del carico impostato è tale da supporre che il materiale rimanga in campo elastico durante l'esecuzione della prova, per cui la deformazione misurata è di tipo reversibile. È importante sottolineare che il materiale viene assunto omogeneo ed isotropo e si applica la teoria dell'elasticità lineare; lo stato tensionale che si sviluppa all'interno del provino è illustrato in Figura 6.6 .

Le sollecitazioni dovute al carico dinamico, che si sviluppano lungo il diametro orizzontale del provino, in particolare sollecitazioni di trazione in direzione X e di compressione in direzione Y, si determinano mediante le relazioni seguenti:

$$\sigma_{x(max)} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (6.5)$$

$$\sigma_{x(media)} = \frac{0.273 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H}$$

$$\sigma_{y(max)} = \frac{-6 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (6.6)$$

$$\sigma_{y(media)} = \frac{-P}{\pi \cdot D \cdot H}$$

dove

P = carico applicato;

D = diametro del provino;

H = altezza o spessore del provino.

Il modulo di rigidezza si esprime pertanto in termini di deformazione di un elemento sottoposto ad uno stato tensionale biassiale. La corrispondente deformazione orizzontale dell'elemento si definisce attraverso l'equazione:

$$\varepsilon_{x(media)} = \frac{\sigma_{x(media)}}{E} - \nu \frac{\sigma_{y(media)}}{E} \quad (6.7)$$

dove

E = modulo di rigidezza o elastico del materiale;

ν = coefficiente di Poisson.

Sostituendo le equazioni (6.5) e (6.6) nell'equazione (6.7) e considerando che la deformazione orizzontale totale z del provino si ottiene moltiplicando la deformazione unitaria $\varepsilon_{x(media)}$ per il diametro del campione D , si ha la relazione:

$$z = \frac{0.273 \cdot P}{E \cdot H} + \nu \frac{P}{E \cdot H} \quad (6.8)$$

Il modulo di rigidezza ITSM è quindi definito dalla relazione:

$$E = \frac{P \cdot (0.273 + \nu)}{z \cdot H} \quad (6.9)$$

dove

E = modulo di rigidezza (MPa);

P = carico verticale applicato (N);

z = deformazione orizzontale (mm);

H = altezza o spessore del provino (mm).

ν = coefficiente di Poisson.

Il modulo ITSM è funzione della geometria del campione, del carico applicato, della deformazione orizzontale e del coefficiente di Poisson.

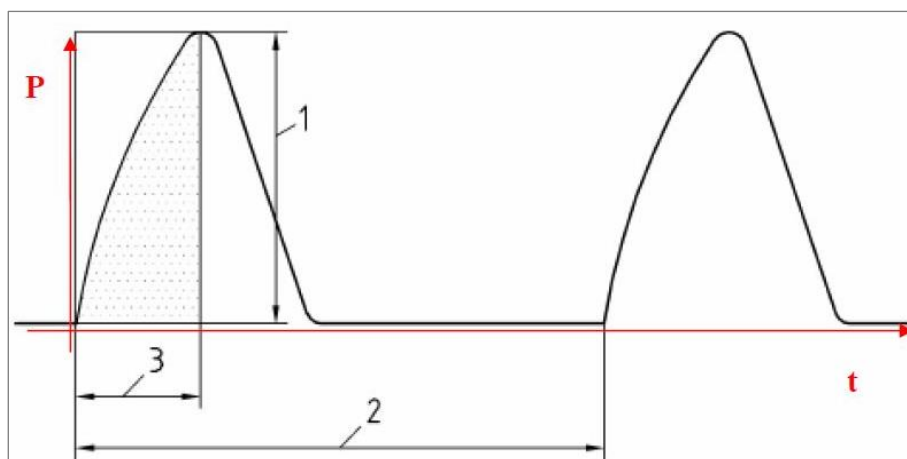


Figura 6.7: Variazione del carico impulsivo P in funzione del tempo.

Il carico applicato P è caratterizzato da tre parametri (Figura 6.7):

1. carico massimo applicato ad ogni ciclo (*peak load*);
2. intervallo temporale tra due impulsi consecutivi (*pulse repetition period*);
3. tempo trascorso tra l'inizio dell'impulso e il carico massimo (*rise time*).

Viene definito inoltre il fattore di area di carico (*load area factor*) come il rapporto tra l'area sottesa alla curva durante il *rise time* (area punteggiata in Figura 6.7) e il prodotto tra *rise time* e *peak load*. Quando tale fattore è diverso da 0.60 il modulo di rigidezza misurato deve essere corretto tramite la seguente formula:

$$E' = E \cdot [1 - 0.322 \cdot (\log E - 1.82) \cdot (0.60 - k)] \quad (6.10)$$

dove

E' = modulo di rigidezza corretto ad un fattore di area di carico 0.6 (MPa);

E = modulo di rigidezza misurato (MPa);

k = fattore dell'area di carico misurato.

6.2.2 PROCEDURA E ATTREZZATURA DI PROVA

6.2.2.1 Macchina di prova

La normativa EN 12697-26 (annesso C) descrive le specifiche della macchina utilizzata per la prova di determinazione del modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta. Essa consta di tre parti principali:

- la camera termostatica per il condizionamento del provino;
- l'attuatore e la struttura di carico;
- il dispositivo di prova per il posizionamento del provino.

L'apparecchiatura in dotazione al Laboratorio di Strade LAS del Dipartimento

DICAM dell'Università di Bologna è prodotta dalla IPC Global e contempla tutte le caratteristiche previste dalla normativa europea (Figura 6.8).

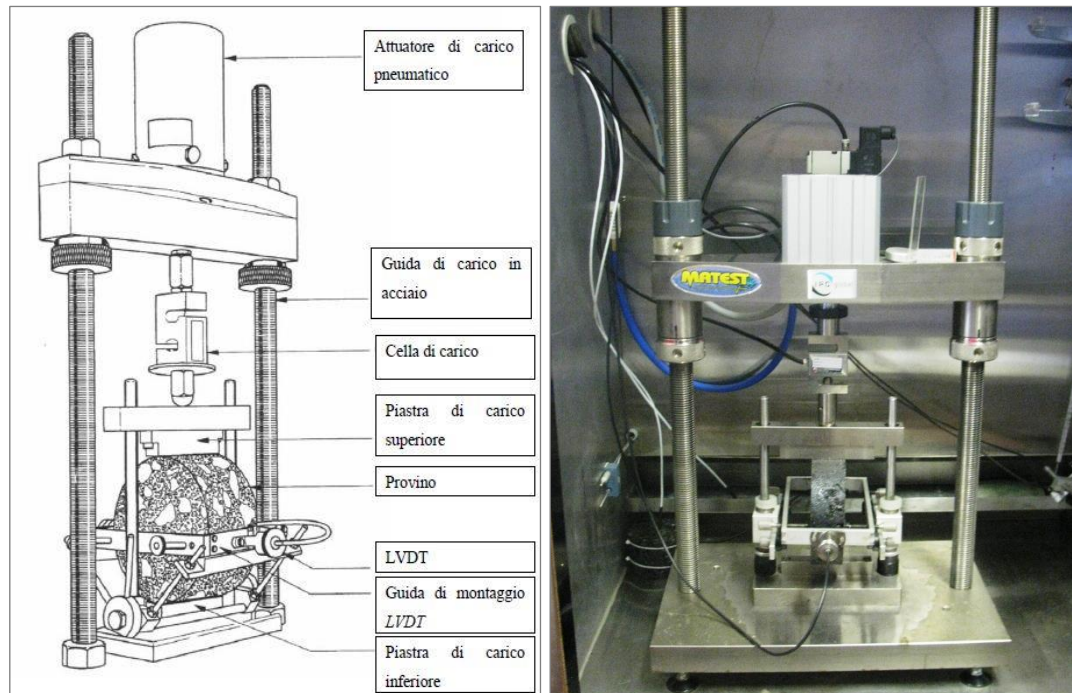


Figura 6.8: Macchina di prova.

La struttura di carico è costituita da una base, due montanti verticali e una trave di contrasto orizzontale che alloggia un attuatore pneumatico per l'applicazione dei carichi verticali. La posizione della trave di contrasto può essere regolata, quindi fissata mediante dadi di serraggio. Collegata all'attuatore vi è una cella di carico per la misura della forza impulsiva applicata. La deformazione orizzontale è misurata attraverso appositi LVDT, posizionati adeguatamente sul provino e collegati al sistema di acquisizione.

La struttura di carico è alloggiata all'interno di una camera termostatica che consente la regolazione e il condizionamento del provino.

La macchina è completata con un sistema di controllo e acquisizione dati e un

software per la gestione della prova (Figura 6.9).



Figura 6.9: Unità di controllo dati (CDAS).

Per quanto riguarda il dispositivo di prova a trazione indiretta, esso consta di due coltelli di carico che presentano un raggio di curvatura (in funzione del diametro del campione 100 o 150 mm), un supporto metallico vincolato al campione che consente il posizionamento degli LVDT sul diametro orizzontale e un telaio di carico e di montaggio.

- Il telaio principale (Figura 6.10.a) ha la funzione di sostenere il provino, che poggia sul coltello di carico inferiore collocato al centro della base e di consentire il posizionamento dell'anello porta LVDT. Sulle due barre di guida verticali, infatti, sono presenti due accessori scorrevoli che, in fase di installazione, sono opportunamente rialzati (in funzione del diametro del provino), mentre durante la prova sono abbassati per svincolare il provino e gli LVDT dal telaio.
- Il telaio portatrasduttori (Figura 6.10.b) alloggia i due LVDT di spostamento, posizionati in corrispondenza del diametro orizzontale e

presenta quattro elementi di serraggio che lo rendono solidale al campione.

- Il coltello di carico superiore (Figura 6.10.c) viene collocato sul provino e presenta la sede di alloggiamento del pistone di carico.

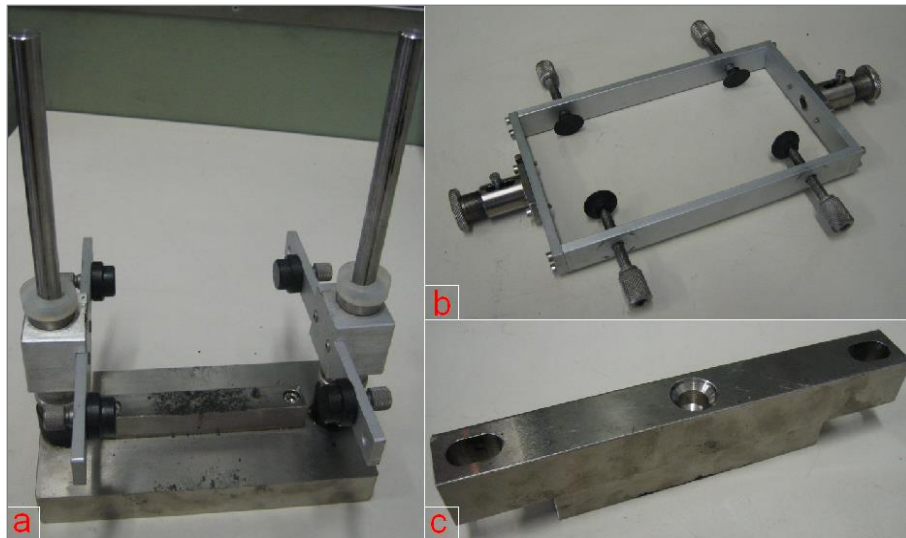


Figura 6.10: Elementi per l'allestimento del provino.

6.2.2.2 Modalità di svolgimento del test

La procedura di prova ha inizio con il condizionamento termico del campione alla temperatura desiderata (generalmente 20°C), che può durare diverse ore, in funzione della temperatura da raggiungere. Il passaggio successivo consiste nel posizionamento del provino nel dispositivo di prova e di quest'ultimo nella struttura di carico; tale dispositivo viene centrato sotto l'attuatore pneumatico (Figura 6.11). Questa fase è molto importante per una corretta esecuzione della prova ed in particolare è fondamentale che gli LVDT siano adeguatamente regolati e vincolati esclusivamente al provino. Terminata tale operazione, si introducono i settaggi di prova nel software di gestione dedicato e si avvia il test.

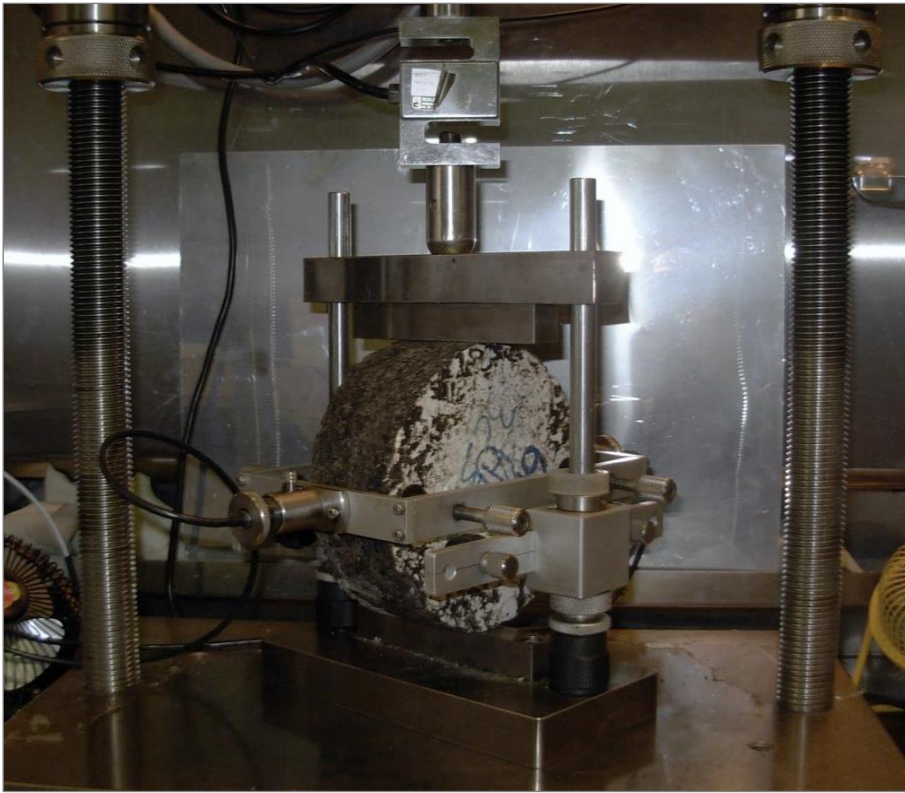


Figura 6.11: Allestimento del provino per il test ITSM.

Nella prima fase di prova sono applicati alcuni impulsi di carico di condizionamento, in genere in numero da 5 a 10, che consentono la calibrazione della forza da applicare per ottenere la deformazione orizzontale desiderata ($5 \pm 2 \mu\text{m}$ per il campione con diametro 100 mm e $7 \pm 2 \mu\text{m}$ per il campione con diametro 150 mm).

Nella seconda fase del test sono applicati gli impulsi di carico e sono calcolati il modulo di rigidezza (ITSM) e quello corretto (come illustrato nel paragrafo 6.2.1.1). In questa operazione la macchina genera 5 impulsi che sono caratterizzati da un *peak load* calcolato nella fase precedente, un *pulse repetition period* ed un *rise time* costanti e preimpostati al momento dell'inizio del test (Figura 6.12). Il valore di ITSM finale è quello medio calcolato.

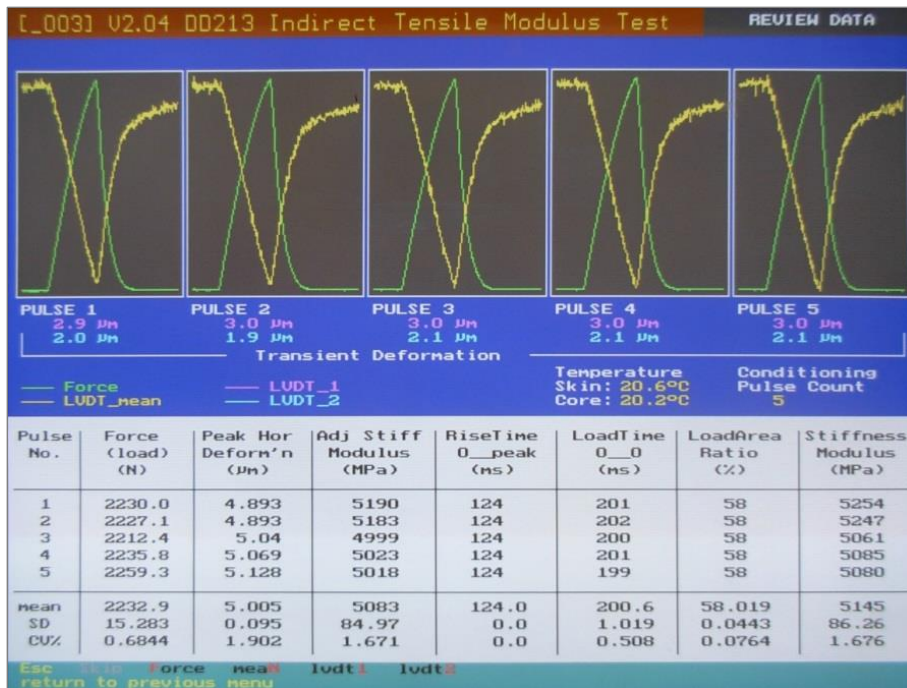


Figura 6.12: Schermata software di prova per la misurazione del modulo ITSM.

La Figura 6.13 mostra le corrispondenti curve di carico e di deformazione in funzione del tempo per un determinato impulso.

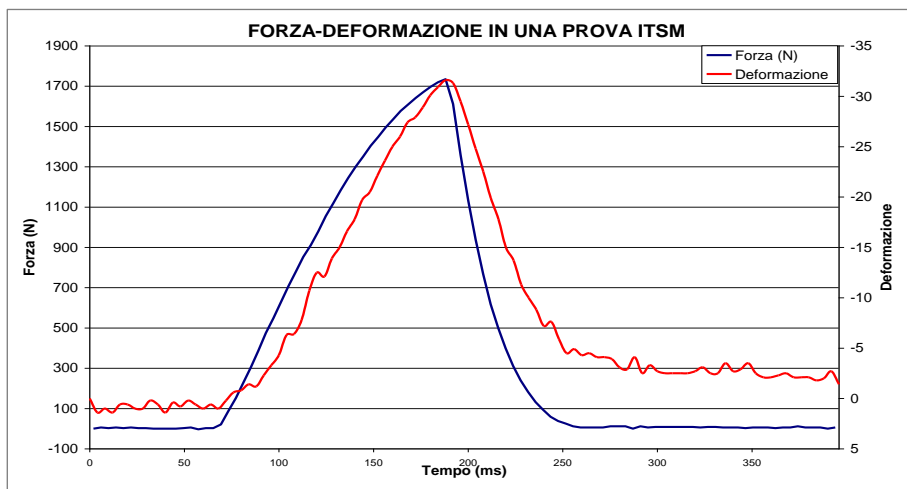


Figura 6.13: Impulso di carico e conseguente deformazione nel tempo.

La misurazione del modulo ITSM deve essere eseguita almeno in due direzioni ortogonali e la differenza dei valori medi deve rimanere all'interno dell'intervallo +10% e -20%, affinché i risultati possano essere considerati validi.

6.2.2.3 Parametri di prova

Le impostazioni di prova utilizzate sono conformi alle specifiche della normativa EN 12697-26 (annesso C) e sono riportate nella Tabella 6.2.

IMPOSTAZIONI DI PROVA		
Temperatura di prova	10-20-30	°C
Diametro provino	150	mm
Altezza provino	60	mm
Impulsi di condizionamento	5	-
Rise time	124	ms
Pulse repetition period	3000	ms
Target peak deformation	7	µm
Coefficiente di Poisson	0.35	-

Tabella 6.2: Parametri di configurazione del test.

Le prove per la determinazione dei moduli di rigidità sui campioni maturati sono state eseguite a tre diverse temperature (10, 20 e 30 °C), al fine di studiare la sensibilità termica delle miscele.

Parallelamente, su alcuni provini destinati allo scopo sono stati calcolati i moduli di rigidità in diverse momenti della fase di maturazione, in particolare al sesto, ventiquattresimo e centoventesimo giorno. Questo ha permesso di valutare l'incremento di rigidità dovuto alla maturazione del campione.

6.2.3 MODULI ITSM E SENSIBILITÀ TERMICA DEI MATERIALI

In questo paragrafo sono illustrati i risultati delle prove di modulo di rigidezza ITSM eseguite per l'analisi della sensibilità termica, ossia per la valutazione dell'influenza e della dipendenza termica delle miscele e dei materiali che le costituiscono. Nella Tabella 6.3 sono riportati i valori ITSM medi alle tre temperature di prova: 10, 20 e 30 °C.

Provino	ITSM (MPa)		
	10°C	20°C	30°C
3.0C_3.5E	10113.5	7163.8	5009.3
3.0C_3.5E+TCR	4012.0	2888.0	2343.0
3.0C_3.5E+CCR	5174.8	3755.8	2482.8
3.0C_5.0E	6642.0	4654.8	2641.3
3.0C_5.0E+TCR	4939.0	3472.0	2452.0
3.0C_5.0E+CCR	5353.8	3710.0	2244.3
1.5C_3.5E	9035.3	6218.5	4090.5
1.5C_3.5E+TCR	3061.8	1708.0	1121.8
1.5C_3.5E+CCR	3899.8	2736.5	1830.0
1.5C_5.0E	6996.5	4481.8	2602.8
1.5C_5.0E+TCR	4052.0	2156.0	1231.0
1.5C_5.0E+CCR	4569.0	3012.3	1821.0

Tabella 6.3: Moduli ITSM medi a 10-20-30°C.

La Figura 6.14 confronta i moduli di rigidezza dei provini senza polverino con quelli contenenti polverino di gomma tradizionale TCR. La Figura 6.15 confronta i moduli di rigidezza dei provini senza polverino con quelli contenenti polverino di gomma criogenico CCR.

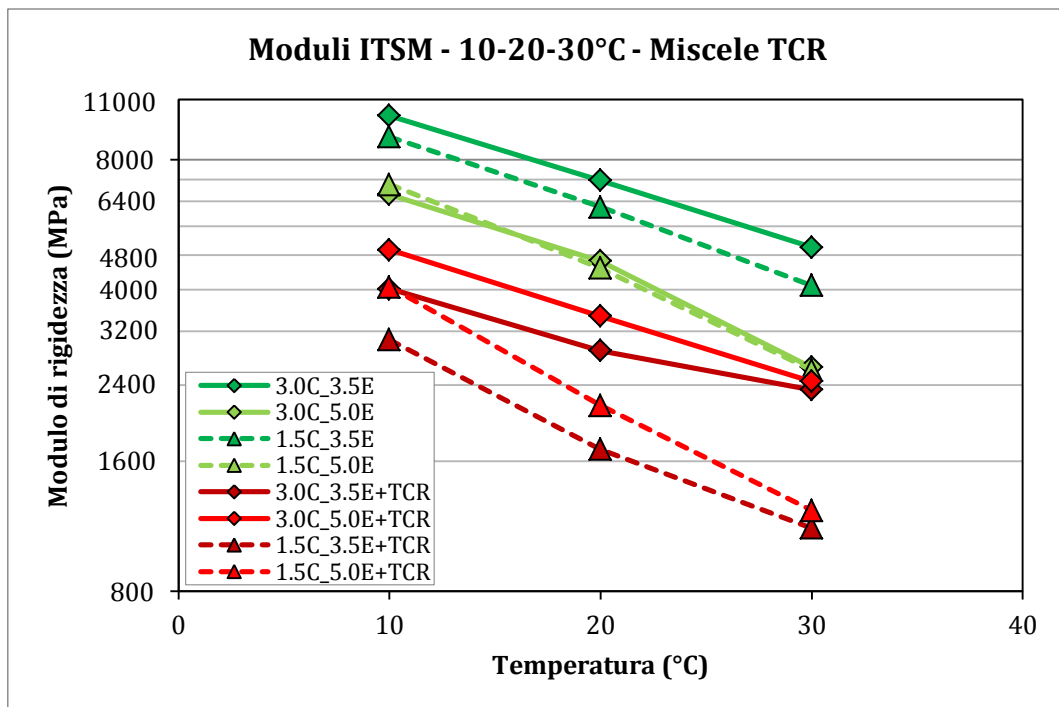


Figura 6.14: Moduli ITSM a 10-20-30°C. Miscele con polverino tradizionale TCR.

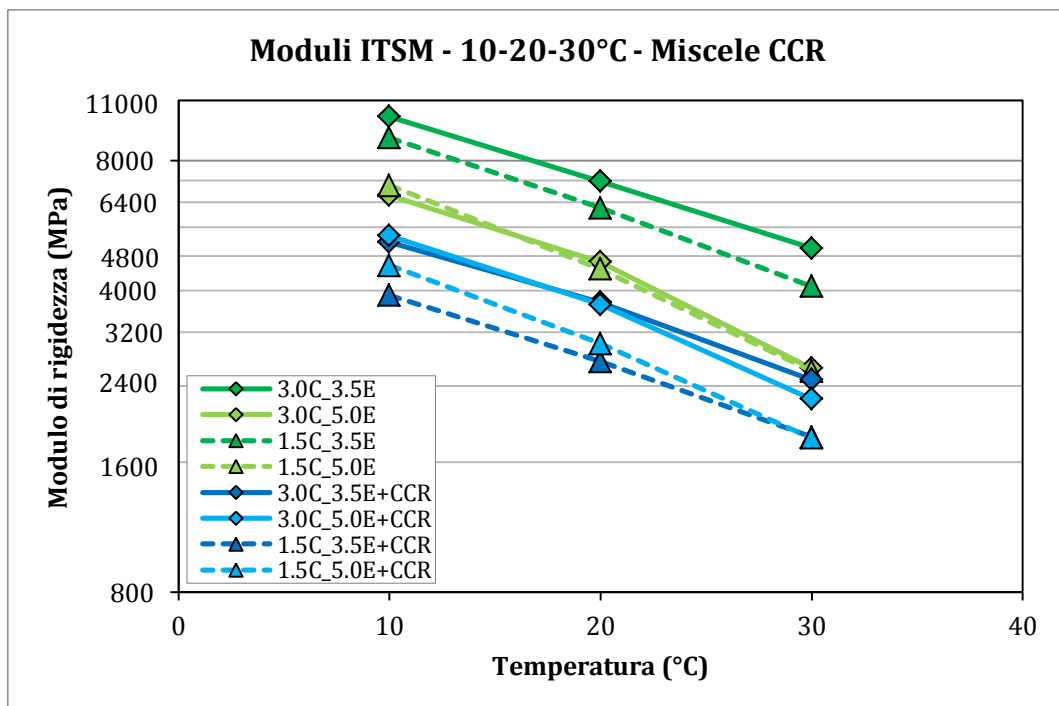


Figura 6.15: Moduli ITSM a 10-20-30°C. Miscele con polverino criogenico CCR.

Dall'analisi dei risultati la prima cosa da evidenziare è che la presenza di polverino, in entrambi i casi, riduce i valori della rigidità dei provini rispetto a quelli dei campioni senza gomma, a tutte le temperature di prova. Dalla Figura 6.14, relativa al TCR, si nota infatti una notevole differenza nei valori dei moduli tra le miscele con 0% e 3% di polverino; queste ultime manifestano valori ITSM decisamente inferiori e naturalmente la forbice è tanto più ampia, quanto maggiore è la rigidità della miscela derivante dalle percentuali di cemento ed emulsione impiegate e dalla temperatura di prova. In particolare la differenza maggiore si osserva per la miscela con 1.5% di cemento e 3.5% di emulsione, per la quale si registra un decremento di circa il 70% tra il provino con TCR e l'omologo senza. Le miscele con 1.5% di cemento e 5.0% di emulsione e quelle con 3.0% di cemento e 3.5% di emulsione registrano cali rispettivamente del 50% e del 60%; la miscela con 3.0% di cemento e 5.0% di emulsione si attesta su valori intorno al 20%.

In Figura 6.15 si denota lo stesso trend anche per le miscele con polverino di gomma criogenico CCR; tuttavia la differenza tra i moduli di rigidità dei provini con CCR e quelli senza risulta meno accentuata. Anche in questo caso la diversità maggiore si osserva per la miscela con 1.5% di cemento e 3.5% di emulsione, per la quale si registra un decremento di circa il 58% tra il provino con CCR e l'omologo senza. Le miscele con 1.5% di cemento e 5.0% di emulsione e con 3.0% di cemento e 3.5% di emulsione registrano cali rispettivamente del 33% e del 49%; la miscela con 3.0% di cemento e 5.0% di emulsione si attesta su valori intorno al 18%.

In termini assoluti i moduli di rigidità massimi si ottengono per i provini senza polverino (CR0%), con il 3.0% di cemento ed il 3.5% di emulsione bituminosa, alla temperatura di 10°C. Come logico attendersi, i valori di modulo ITSM maggiori si

ottengono alla temperatura di prova più bassa, in corrispondenza della quale il materiale risulta più rigido. Tale comportamento è dovuto in larga parte alla caratteristica di termodipendenza del legante bituminoso. Il polverino, invece, non sembra influire, se non in quota trascurabile e solo per il TCR, sulla sensibilità termica delle miscele; le pendenze dei grafici rimangono pressoché costanti in seguito all'aggiunta di polverino e le miscele relative presentano, in termini percentuali, la stessa variabilità del modulo di rigidezza al mutare della temperatura di prova.

L'influenza dell'emulsione bituminosa sul comportamento dei provini è duplice. Nelle miscele senza polverino l'incremento dal 3.5% al 5.0% provoca una notevole riduzione dei moduli, nell'ordine del 40% per i provini con 3.0% di cemento e del 30% per quelli con 1.5%; in altre parole, l'aumento della componente bituminosa riduce la rigidezza della miscela. In quelle con polverino questo fenomeno si riduce fin quasi ad annullarsi o addirittura ad invertire la tendenza; quest'ultimo aspetto evidenzia nuovamente l'affinità tra emulsione e polverino. Aumentando il dosaggio del primo elemento, si ha una migliore integrazione tra le particelle di gomma e gli altri elementi del campione; ciò conferisce maggiore omogeneità e favorisce l'addensamento. Ne consegue che le variazioni comportamentali e reologiche dovute all'aggiunta della gomma all'interno della miscela siano attenuate dal maggiore tenore di legante bituminoso che finisce per ricoprire un ruolo fondamentale nella determinazione delle caratteristiche meccaniche del conglomerato.

Al confronto dei risultati di prova tra il polverino tradizionale e quello criogenico sono dedicati i grafici successivi: in Figura 6.16 sono riportati i moduli ITSM per le miscele con il 3.5% di emulsione bituminosa e in Figura 6.17 per quelle che ne contengono il 5.0%.

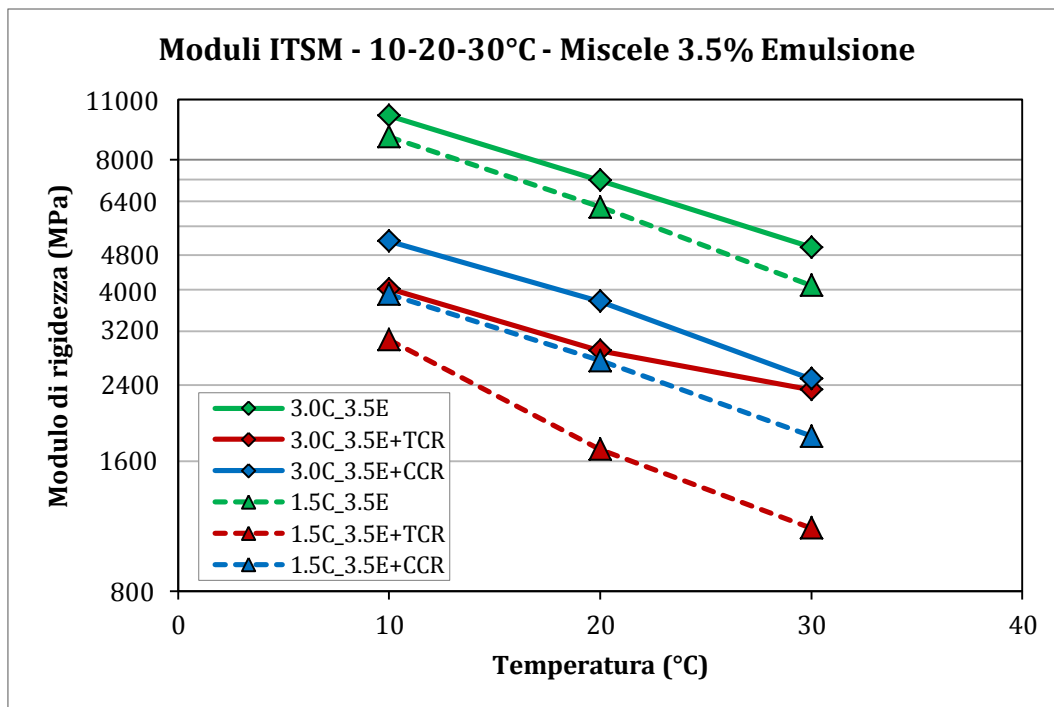


Figura 6.16: Moduli ITSM a 10-20-30°C. Miscela con 3.5% emulsione. Polverino TCR e CCR.

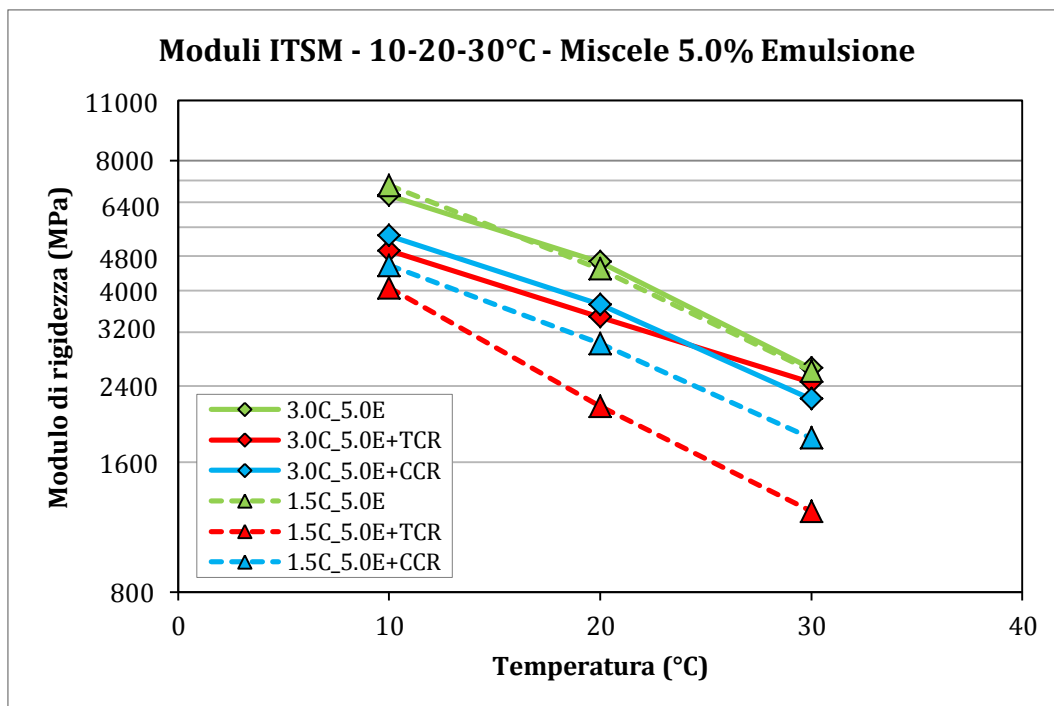


Figura 6.17 Moduli ITSM a 10-20-30°C. Miscela con 5.0% emulsione. Polverino TCR e CCR.

Dall'analisi dei risultati si deduce la diversa influenza che le due tipologie di polverino hanno sul comportamento dei provini. Partendo dall'osservazione delle miscele con il 3.5% di emulsione bituminosa, si nota come i campioni contenenti polverino tradizionale TCR abbiano una rigidità ITSM minore rispetto ai rispettivi provini con polverino criogenico CCR, a parità di tutte le altre caratteristiche e ad ogni temperatura di prova. Nel confronto tra le diverse miscele, a parità di contenuto di polverino, è invece il cemento ad avere un ruolo predominante, come è lecito attendersi infatti una diminuzione del dosaggio comporta una riduzione del modulo ITSM.

Il comportamento evidenziato per i campioni con 3.5% di emulsione si osserva anche per le miscele con il tenore superiore (5.0%), seppur con differenze, nel complesso, meno accentuate. Con l'utilizzo di polverino di gomma (sia TCR sia CCR) e di un tenore del 3.0% di cemento si riescono ad ottenere valori dei moduli di rigidità strettamente confrontabili con quelli delle miscele senza gomma. Anche in questo caso un dosaggio ricco in cemento comporta un irrigidimento della struttura del provino e valori ITSM superiori, a parità di tutte le altre caratteristiche.

In termini di sensibilità termica, si rileva nuovamente come le pendenze dei grafici rimangano pressoché costanti e parallele tra di loro, a conferma che l'aggiunta di polverino non influisce su tale caratteristica. Il comportamento è confermato anche dagli incrementi e decrementi percentuali dei moduli di rigidità (a 10°C e a 30°C) calcolati rispetto al riferimento a 20°C, per ciascuna tipologia di provino. Tali valori sono riportati nella Tabella 6.4, quelli del polverino CCR sono perfettamente analoghi a quelli delle miscele senza gomma; il TCR presenta qualche singolarità (a 10°C con miscele meno ricche di cemento e a 30°C con miscele più ricche di cemento), non

imputabile tuttavia alla termodipendenza del materiale.

ITSM (MPa)			
Provino	10°C	20°C	30°C
3.0C_3.5E	41.2	7163.8	-30.1
3.0C_3.5E+TCR	38.9	2888.0	-18.9
3.0C_3.5E+CCR	37.8	3755.8	-33.9
3.0C_5.0E	42.7	4654.8	-43.3
3.0C_5.0E+TCR	42.3	3472.0	-29.4
3.0C_5.0E+CCR	44.3	3710.0	-39.5
1.5C_3.5E	45.3	6218.5	-34.2
1.5C_3.5E+TCR	79.3	1708.0	-34.3
1.5C_3.5E+CCR	42.5	2736.5	-33.1
1.5C_5.0E	56.1	4481.8	-41.9
1.5C_5.0E+TCR	87.9	2156.0	-42.9
1.5C_5.0E+CCR	51.7	3012.3	-39.5

Tabella 6.4: Incrementi percentuali dei moduli ITSM rispetto ai valori a 20°C.

In conclusione, a parità di dosaggio di emulsione bituminosa e di cemento e a parità di temperatura di prova, il polverino di gomma criogenico CCR mostra nuovamente caratteristiche meccaniche migliori rispetto a quello tradizionale. Si ritiene che ancora una volta la spiegazione sia da ricercare nella composizione granulometrica delle particelle di gomma. Il maggiore contenuto di materiale fine nel polverino CCR, oltre a consentire migliore lavorabilità ed addensabilità (come visto nell'analisi di prequalifica), contribuisce a fornire caratteristiche di rigidità meccanica più simili a quelle possedute da campioni omologhi senza l'aggiunta di gomma. Ne consegue che l'utilizzo del polverino CCR è preferibile all'aggiunta di quello tradizionale TCR.

6.2.4 MODULI ITSM E MATURAZIONE DEI PROVINI

In questo paragrafo sono illustrati i risultati delle prove per la determinazione del modulo ITSM, eseguite su alcuni campioni destinati all'analisi dell'incremento di rigidità in diverse fasi della maturazione. I test sono stati eseguiti a 6 (rimozione del provino dalla stufa), 24 e 120 giorni (maturazione completa). Nella Tabella 6.5 sono riportati i valori ITSM, alla temperatura di prova di 20°C.

Provino	ITSM (MPa)		
	6 gg	24 gg	120 gg
3.0C_3.5E	5362.5	6332.3	7163.8
3.0C_3.5E+TCR	2234.8	2711.2	2888.0
3.0C_3.5E+CCR	3254.8	3644.5	3755.8
3.0C_5.0E	3430.5	3791.3	4654.8
3.0C_5.0E+TCR	2533.0	2936.2	3472.0
3.0C_5.0E+CCR	2884.0	3209.5	3710.0
1.5C_3.5E	4635.3	5002.3	6218.5
1.5C_3.5E+TCR	1283.9	1581.9	1708.0
1.5C_3.5E+CCR	2237.8	2733.0	2736.5
1.5C_5.0E	2911.5	3404.5	4481.8
1.5C_5.0E+TCR	1683.5	1902.0	2156.0
1.5C_5.0E+CCR	2383.5	2542.3	3012.3

Tabella 6.5: Moduli ITSM medi a 6, 24 e 120 giorni di maturazione.

La Figura 6.18 e Figura 6.19 confrontano i moduli di rigidità dei provini senza polverino con quelli contenenti polverino TCR e CCR. La comparazione tra le due tipologie di polverino è evidenziata nella Figura 6.20, che riporta i moduli ITSM per le miscele con il 3.5% di emulsione e nella Figura 6.21 per quelle contenenti il 5.0%.

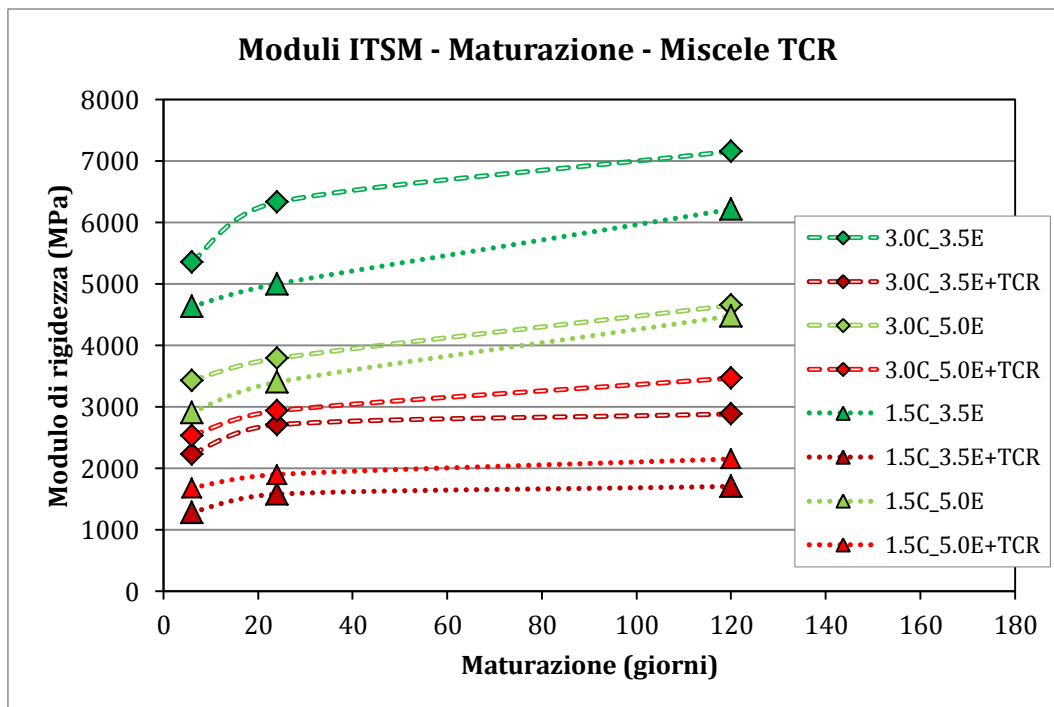


Figura 6.18: Andamento del modulo ITSM nel tempo. Miscela con polverino tradizionale TCR.

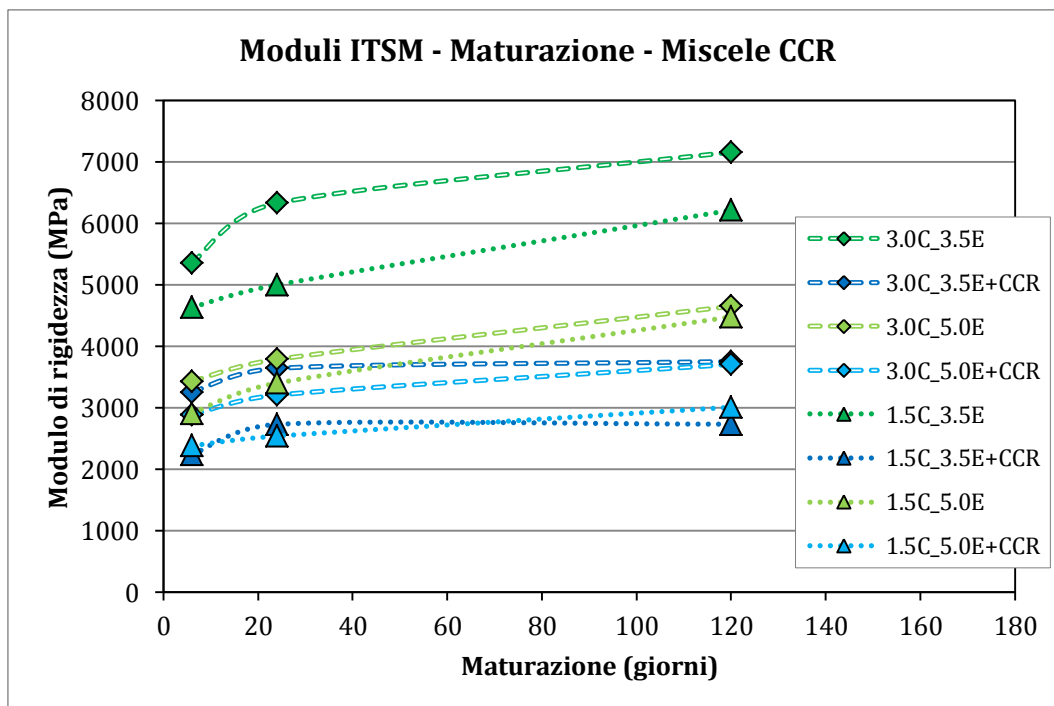


Figura 6.19: Andamento del modulo ITSM nel tempo. Miscela con polverino criogenico CCR.

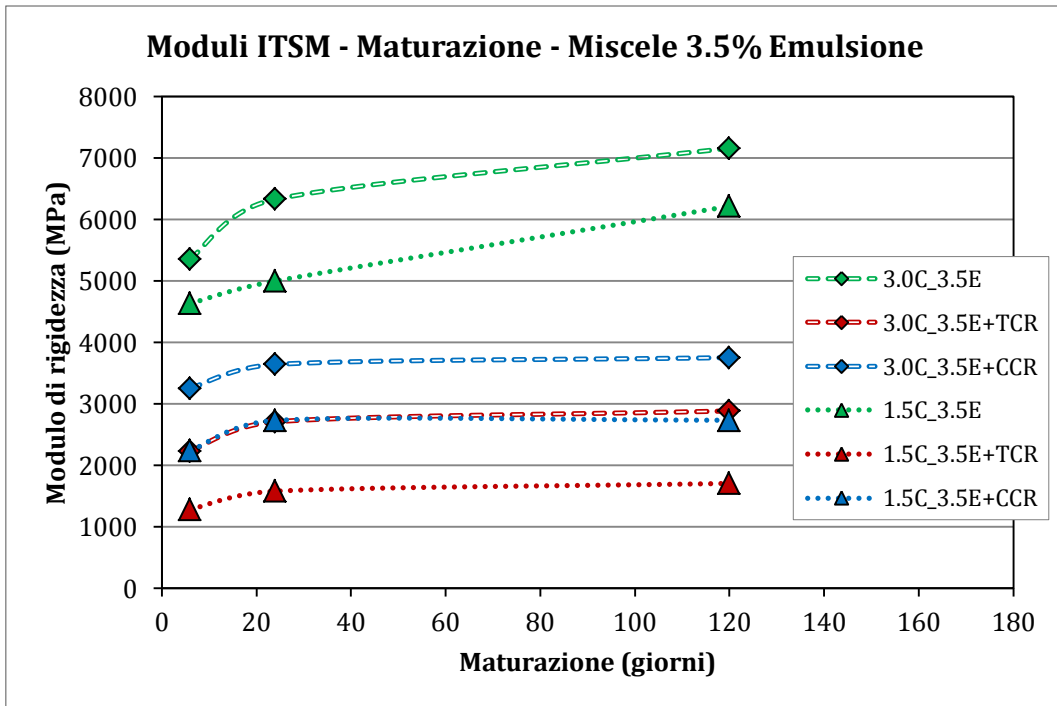


Figura 6.20: Andamento del modulo ITSM nel tempo. Miscela con 3.5% emulsione.

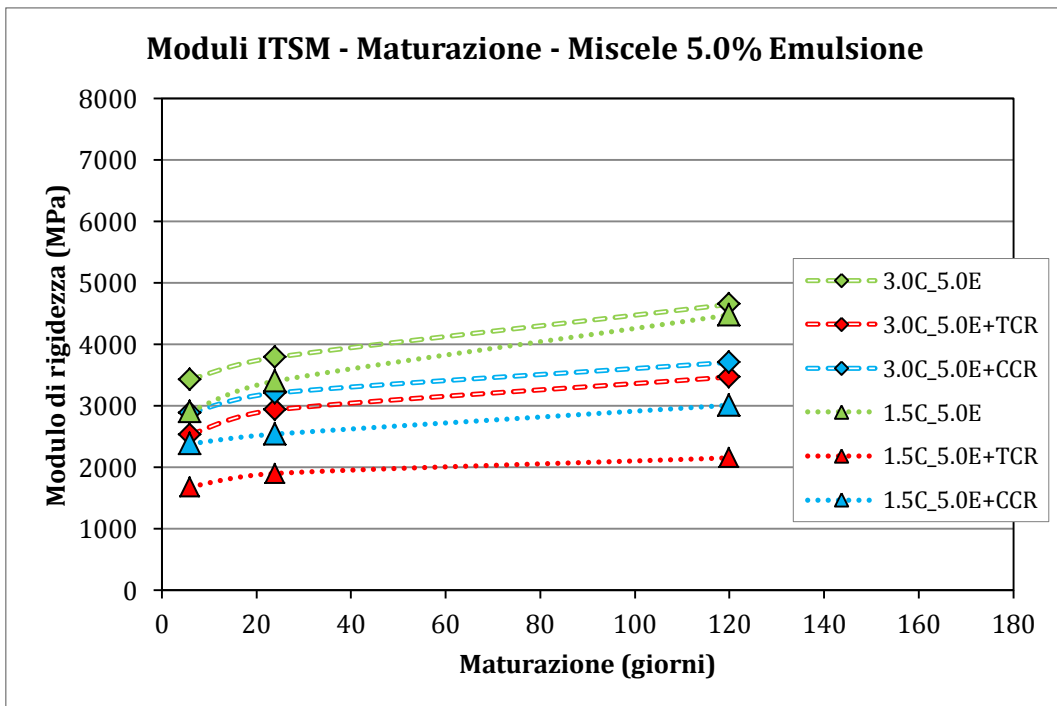


Figura 6.21: Andamento del modulo ITSM nel tempo. Miscela con 5.0% emulsione.

Dall'analisi dei risultati, la prima cosa da evidenziare è che la presenza di polverino, in entrambi i casi, riduce la rigidità dei provini rispetto ai valori dei campioni senza polverino e ciò vale per tutte le fasi di maturazione. Le considerazioni fatte nel paragrafo precedente sui valori di ITSM alle diverse temperature sono confermate anche in quest'analisi; il trend evidenziato sui valori di rigidità finali (120 giorni) si ripete anche per le fasi iniziali di maturazione, sia riguardo al polverino TCR, sia a quello CCR. Il ruolo dell'emulsione e del cemento sono i medesimi. L'incremento di emulsione produce una notevole riduzione dei moduli nelle miscele senza polverino, mentre in quelle con polverino il fenomeno tende ad invertirsi. L'aumento del dosaggio del cemento, a parità di emulsione, incrementa sempre il valore di ITSM.

Ciò che differisce e che è importante rilevare è la velocità di maturazione dei provini, in funzione della loro composizione. I grafici evidenziano chiaramente come le pendenze riguardanti i campioni con polverino di gomma siano meno accentuate di quelle omologhe per le miscele CR0%; ciò implica che i provini con TCR e CCR tendono a raggiungere più velocemente il valore massimo finale di ITSM. In particolare, tale fenomeno si verifica maggiormente nelle miscele con un dosaggio inferiore (3.5%) di emulsione bituminosa (Figura 6.20). La differenza di pendenza rispetto alle miscele senza gomma è ben più netta di quanto non accada per le miscele più ricche di emulsione (Figura 6.21).

Per una più rapida lettura e una chiara interpretazione di tale comportamento, in Tabella 6.6 sono riportati gli incrementi percentuali progressivi dei moduli di rigidità ITSM rispetto al valore finale ed alle diverse fasi di maturazione. In Figura 6.22 tali risultati di prova sono illustrati graficamente.

Incremento ITSM (%)					
Provino	6 gg	24 gg	120 gg		
3.0C_3.5E	74.9	+13.5	88.4	+11.6	100
3.0C_3.5E+TCR	77.4	+16.5	93.9	+6.1	100
3.0C_3.5E+CCR	86.7	+10.4	97.0	+3.0	100
3.0C_5.0E	73.7	+7.8	81.4	+18.6	100
3.0C_5.0E+TCR	73.0	+11.6	84.6	+15.4	100
3.0C_5.0E+CCR	77.7	+8.8	86.5	+13.5	100
1.5C_3.5E	74.5	+5.9	80.4	+19.6	100
1.5C_3.5E+TCR	75.2	+17.4	92.6	+7.4	100
1.5C_3.5E+CCR	81.8	+18.1	99.9	+0.1	100
1.5C_5.0E	65.0	+11.0	76.0	+24.0	100
1.5C_5.0E+TCR	78.1	+10.1	88.2	+11.8	100
1.5C_5.0E+CCR	79.1	+5.3	84.4	+15.6	100

Tabella 6.6: Incremento percentuale dei moduli ITSM durante la maturazione.

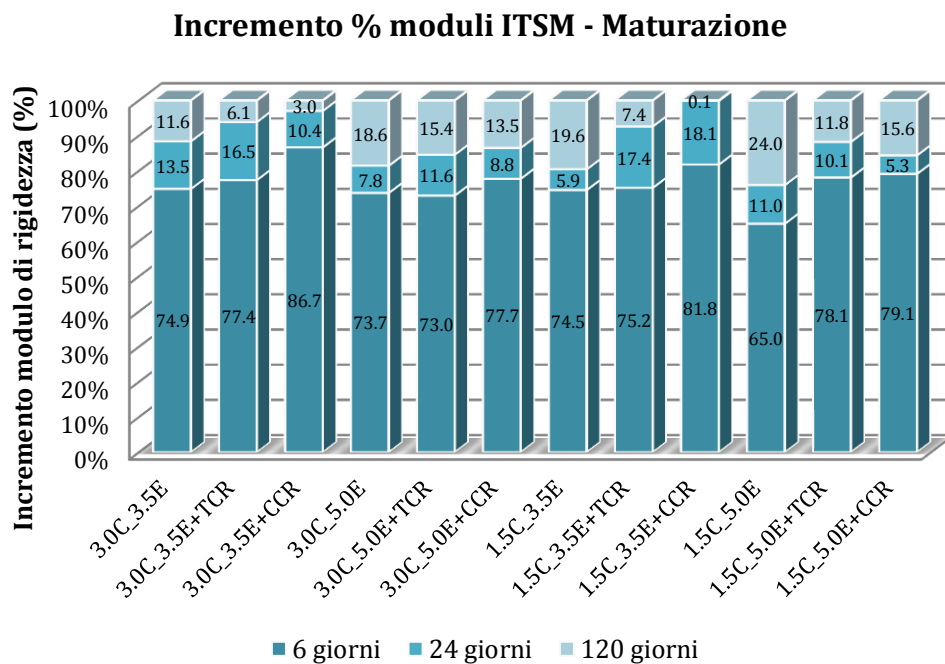


Figura 6.22: Incremento percentuale dei moduli ITSM durante la maturazione.

Dai dati si evidenzia che, per le miscele con 3.5% di emulsione bituminosa i valori di rigidità per i provini con polverino dopo 6 giorni di maturazione presentano percentuali già considerevoli: superiori al 75% per il TCR e all'82% per il CCR. La percentuale dei TCR è paragonabile a quella delle miscele senza gomma. Dopo 24 giorni la maggiore velocità di maturazione permette il raggiungimento di un'aliquota del modulo finale superiore al 92% per il TCR e al 97% per il CCR. Le curve di maturazione dell'ultima fase (da 24 a 120 giorni) risultano infatti pressoché orizzontali. I corrispondenti provini senza gomma si attestano invece su valori inferiori: 88% per il 3.0% di cemento e 80% per l'1.5%. In quest'ultimo caso il processo di sviluppo delle proprietà finali procede più lentamente e la fase di maturazione conclusiva è pertanto contraddistinta da un irrigidimento non trascurabile per il raggiungimento delle caratteristiche meccaniche del campione. Lo stesso comportamento è presente anche nei provini con 5.0% di emulsione di bitume. Tuttavia il gap tra campioni con e senza gomma si riduce; dopo 24 giorni di maturazione infatti i provini con polverino presentano una percentuale del modulo compreso tra 85% e 88%, mentre per quelli CR0% esso varia da 76% a 81%. Tutte le curve di maturazione risultano infatti contraddistinte da una pendenza caratteristica nell'ultima fase.

Si ritiene che il fattore principale che influenza il tempo di maturazione sia la fase liquida complessiva della miscela, in relazione al tenore di emulsione di bitume ed al dosaggio di cemento utilizzati. La velocità con cui la miscela sviluppa le sue proprietà di resistenza è collegata al contenuto di acqua (proveniente dalla rottura dell'emulsione e dalla percentuale di correzione) e all'eliminazione dello stesso liquido, non strettamente necessario alla presa e all'indurimento del cemento.

Maggiore è il quantitativo di liquido, più lenta risulta essere la velocità con cui si sviluppano le caratteristiche meccaniche. Infine il polverino sembra agevolare la velocità di maturazione; si ritiene che la sua composizione omogenea e la scarsa capacità assorbente non trattengano acqua in eccesso, favorendo l'eliminazione di quest'ultima ed accelerando i tempi di presa ed indurimento.

6.3 PROVA DI FATICA ITFT

6.3.1 LA FATICA: DEFINIZIONE E TEORIA

Le pavimentazioni stradali sono soggette nel corso della loro vita a sollecitazioni meccaniche ripetute, a variazioni cicliche di temperatura e a fenomeni usuranti come le precipitazioni ed i cicli di gelo e disgelo.

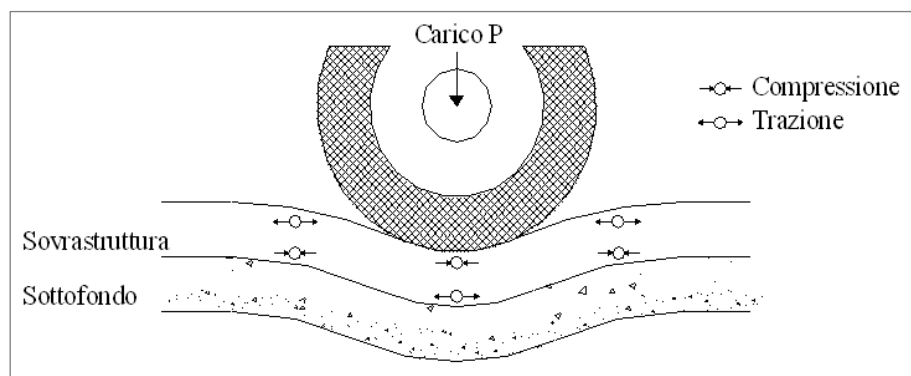


Figura 6.23: Stati tensionali indotti dal transito di un veicolo.

La ripetitività 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 (Figura 6.23).

Se la pavimentazione è soggetta a cicli di carico di entità inferiore a quelli necessari per causarne la rottura, si dice che essa è soggetta a *fatica* ed il danneggiamento per fatica è un fenomeno che si sviluppa nel tempo, in seguito ad un elevato numero di ripetizioni di carico che abbattano progressivamente il livello di servizio, fino addirittura al completo degrado della sovrastruttura ed alla sua perdita di funzionalità, nel caso in cui non si intervenga opportunamente. Nella pratica avviene che, ad ogni passaggio, corrisponda un decadimento delle proprietà meccaniche del materiale della pavimentazione, decadimento associato alla formazione di microlesioni fino alla comparsa di fessure visibili anche ad occhio nudo.

Tra le forme di fessurazione per fatica più comuni si possono indicare quelle generate alla base degli strati legati a bitume, che si propagano verso la superficie e quelle che, generatesi in superficie, tendono ad insinuarsi verso il basso nello spessore bituminoso (Figura 6.24).

Le prime, in genere identificate col termine inglese *bottom-up*, si creano per effetto delle ripetute sollecitazioni flessionali cui è soggetta la sovrastruttura stradale, sollecitazioni 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 in superficie manifesta crepe che si propagano in profondità.



Figura 6.24: Propagazione delle fessure nelle pavimentazioni stradali.

L'importanza dell'analisi del fenomeno risulta quindi evidente: lo studio delle prestazioni a fatica permette di impiegare i materiali stradali al meglio delle loro capacità, al fine di protrarre nel tempo la durata utile delle pavimentazioni stradali.

6.3.1.1 Prova a fatica in configurazione di trazione indiretta ITFT

Le prove di laboratorio per la determinazione del comportamento a fatica sottopongono provini prismatici, trapezoidali o cilindrici a carichi ciclici di compressione, trazione o flessione, variabili nel tempo, in genere con legge sinusoidale. La prova a fatica in configurazione di trazione indiretta (ITFT *Indirect Tensile Fatigue Test*) è condotta sottoponendo un provino cilindrico a carichi di compressione verticale diametrale ripetuti e registrando il numero di applicazioni necessario per provocarne la rottura.

Le specifiche di prova sono state recepite dalla normativa europea EN 12697-24 (annesso E): Miscele bituminose, metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo. Parte 24: Resistenza alla fatica.

La configurazione di prova 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.

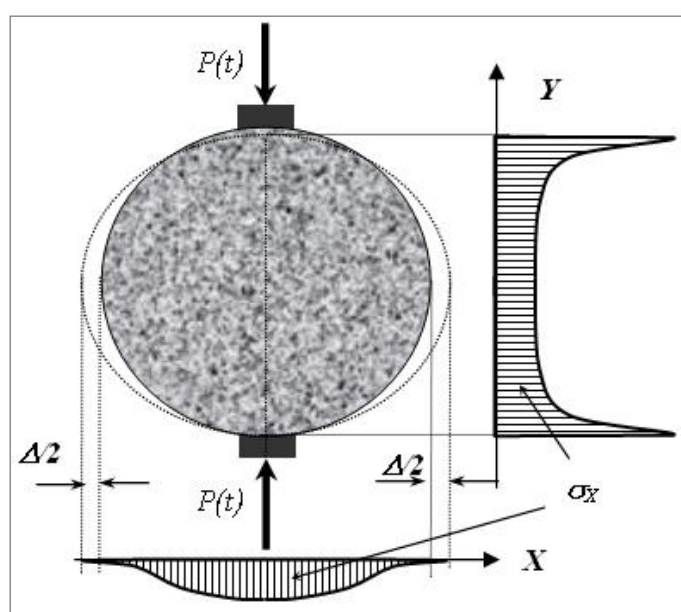


Figura 6.25: Stato di sollecitazione biassiale nella configurazione di trazione indiretta.

Al centro del provino le sollecitazioni massime di trazione e compressione (Figura 6.25) si calcolano utilizzando la teoria dell'elasticità lineare e assumendo che il materiale sia omogeneo e isotropo, con le formule seguenti:

$$\begin{aligned}\sigma_t &= \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot b \cdot H} \left(\sin 2\alpha - \frac{b}{2 \cdot R} \right) \\ \sigma_c &= \frac{-6 \cdot P}{\pi \cdot b \cdot h} \left(\sin 2\alpha - \frac{b}{2 \cdot R} \right)\end{aligned}\tag{6.11}$$

dove

P = carico verticale applicato;

b = spessore della striscia di carico;

R = raggio del provino;

h = altezza del provino;

2α = angolo al centro sotteso dalla larghezza della striscia di carico.

Al centro del provino la compressione è quindi tre volte superiore alla trazione orizzontale. La massima deformazione orizzontale è espressa come:

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t \cdot (1 + 3\nu)}{E}\tag{6.12}$$

dove

E = modulo di rigidezza;

ν = 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, è indispensabile per calcolare la deformazione ε_t che si utilizza in ordinata per tracciare le curve di fatica di Wöhler (Figura 6.26). Queste esprimono l'ampiezza di sollecitazione (tensione o deformazione) applicata in funzione del numero di cicli ed è generalmente rappresentata da una retta su un piano bi-logaritmico. Il suo

andamento è descritto da una relazione del tipo:

$$N = k \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^n \quad (6.13)$$

oppure:

$$\ln(N) = k + n \cdot \ln(\varepsilon_t) \quad (6.14)$$

dove

N = numero di applicazioni di carico per soddisfare il criterio di rottura;

n, k = coefficienti di regressione legati alle caratteristiche del materiale ed alla metodologia e condizioni di prova.

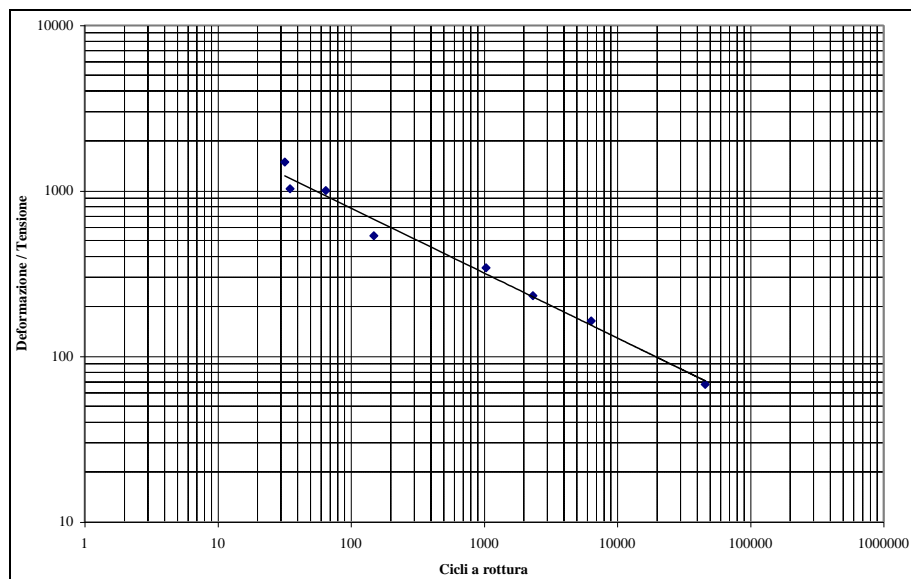


Figura 6.26: Curva di fatica di Wöhler.

6.3.1.2 Tipo e modalità di carico

Lo schema di carico impiegato in una prova a fatica può variare secondo leggi differenti. Nella Figura 6.27 sono rappresentati diversi tipi di forme di carico, generalmente utilizzati per questo tipo di prove.

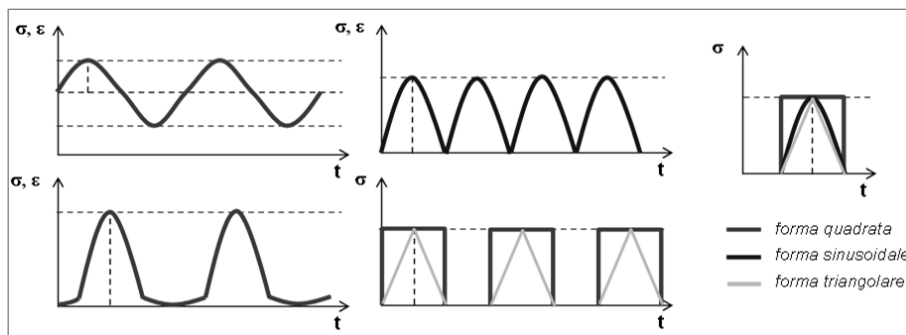


Figura 6.27: Tipologie di forme d'onda di carico.

In generale forze o spostamenti e quindi tensioni o deformazioni possono essere imposte al provino in vario modo; la forma più comune è l'onda sinusoidale o semisenversa. Vi sono anche test nei quali l'applicazione è impulsiva o intermittente con forme differenti della singola applicazione, variabili anche in ragione delle potenzialità dello strumento di prova.

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 e di tempo di caricamento, onde con area sottesa maggiore somministrano maggiore energia al provino, riducendone la vita a fatica.

Oltre alla diversa tipologia di carico, si possono distinguere anche due tipologie di caricamento differenti:

- *controllo di forza o tensione*: la forza o tensione applicata è mantenuta costante in ampiezza durante il test (Figura 6.28);
- *controllo di spostamento o deformazione*: lo spostamento o la deformazione sono mantenuti costanti in ampiezza durante il test (Figura 6.29).

Nelle prove a tensione controllata (*stress control*) la deformazione tende ad

aumentare gradualmente fino al collasso poiché, con il progredire del numero dei cicli diminuisce la rigidità del campione. Nelle prove a deformazione controllata (*strain control*) lo sforzo o il carico tendono a diminuire con l'aumento del numero di cicli, poiché le caratteristiche del provino degradano gradualmente, richiedendo una sollecitazione inferiore per generare la medesima deformazione.

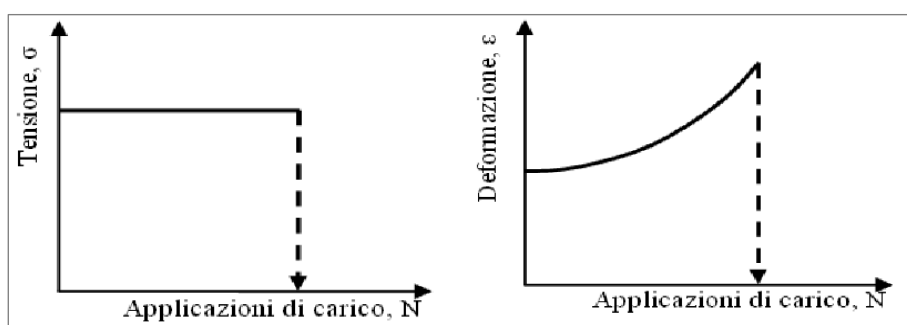


Figura 6.28: Test a fatica in controllo di forza o tensione.

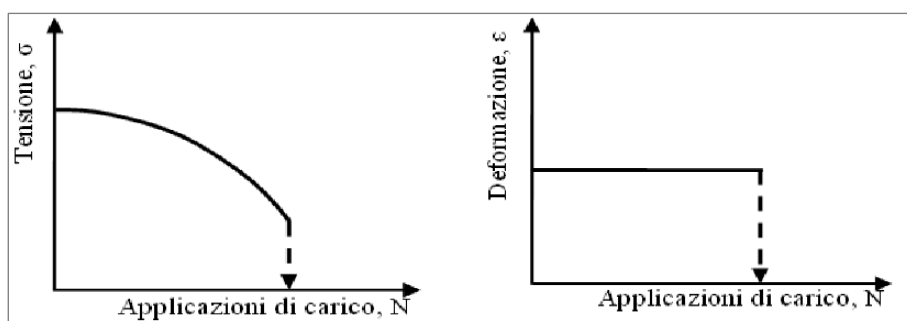


Figura 6.29: Test a fatica in controllo di spostamento o deformazione.

I risultati ottenuti sulla stessa miscela bituminosa con una prova a tensione o a deformazione controllata sono notevolmente diversi e l'influenza del tipo di prova è evidente se, considerando provini identici testati mediante i due metodi, si considera l'effetto della rigidità sulla durata a fatica. Se i campioni sono sottoposti ad uno stato di tensione controllata, ad esempio con una sollecitazione variabile con legge

sinusoidale e di ampiezza costante, l'aumento di rigidità del materiale comporta un incremento della resistenza a fatica. Se gli stessi campioni sono testati con un dispositivo che induce deformazioni applicate con ampiezza costante, con rigidità più bassa mostrano un andamento inverso rispetto a quello in regime di sforzo controllato, cioè la resistenza a fatica maggiore si associa a rigidità minori.

Il differente comportamento nei due tipi di prove può essere collegato al modo con cui si sviluppa la fessurazione nel materiale. Il collasso inizia con la formazione di microlesioni nella zona caratterizzata dalla maggiore concentrazione di sforzi e prosegue con la fase di propagazione della fessurazione, fino a giungere alla frattura. Si possono quindi individuare due fasi distinte: la prima d'innescamento della fessura e la seconda di propagazione; quest'ultima dipende dalla concentrazione degli sforzi alla sua sommità. In una prova a sforzo controllato la propagazione è molto rapida, dunque il provino perviene alla completa frattura in un tempo relativamente breve. Nelle prove a deformazione controllata, al contrario, la fessurazione comporta una riduzione degli sforzi poiché la rigidità del provino gradualmente diminuisce. La conseguenza è un incremento del periodo di propagazione, che aumenta ulteriormente con valori bassi della rigidità.

6.3.1.1 Criterio di rottura

In laboratorio, la rottura è definita sulla base di uno specifico criterio scelto in funzione del tipo e delle 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 rigidezza, od un'altra proprietà del campione, si riduce (o aumenta) sensibilmente rispetto al suo valore iniziale.

Oltre ai criteri tradizionali, la rottura può basarsi su un approccio di tipo energetico (A.C.Collop e J.Read) attraverso il quale si valuta la relazione tra il numero di cicli di prova e l'energia dissipata durante il test. Diversi autori avanzano l'ipotesi che esista un'unica relazione tra la vita a fatica di un provino in conglomerato bituminoso e l'energia totale dissipata durante tutto il test, fino alla rottura.

Durante la sollecitazione si può, in effetti, riscontrare una dissipazione energetica dovuta al comportamento viscoelastico del materiale. La dissipazione di tale energia è in gran parte associata alla deformazione viscosa del materiale che la trasforma in calore, ma anche alla formazione di microlesioni nel materiale, che conducono alla rottura. Sulla base di tale criterio A.C.Collop e J.Read nel 1997 hanno proposto una semplificazione, dimostrando come l'andamento del *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 6.30 si può vedere come i due criteri non convergano in una definizione univoca del numero di cicli del punto di rottura, ma individuino due distinti numeri di cicli (N) che soddisfano i due criteri. La rottura fisica del provino avviene sempre con un numero di cicli superiore a quello necessario per definire quella che si registra con l'approccio energetico.

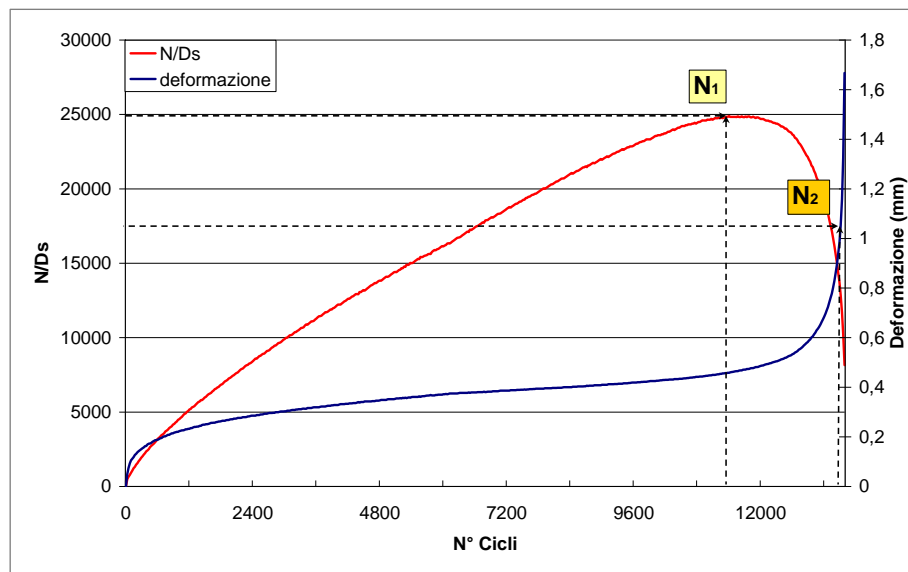


Figura 6.30: Andamento dell'energia dissipata in funzione del numero di cicli.

La scelta del criterio di rottura è, come detto, legata alla metodologia ed alla configurazione di prova adottata; pertanto un commento ingegneristico dei risultati di prove non può prescindere dalla sua conoscenza.

6.3.2 PROCEDURA E ATTREZZATURA DI PROVA

6.3.2.1 Macchina di prova

L'apparecchiatura utilizzata per l'esecuzione delle prove di resistenza a fatica in configurazione di trazione indiretta è la stessa con la quale si è determinato il modulo di rigidità ITSM (paragrafo 6.2.2.1). Anche in questo circostanza le componenti principali di prova sono:

- la camera termostatica per il condizionamento del provino;
- l'attuatore e la struttura di carico;

- il dispositivo di prova per il posizionamento del provino.

Le caratteristiche della camera termostatica e dell'attuatore sono le medesime già illustrate. Per quanto riguarda il dispositivo di prova, esso consta esclusivamente dei due coltelli di carico e del telaio, senza il supporto metallico per il posizionamento dei LVDT sul diametro orizzontale.

La normativa europea che descrive le caratteristiche della prova ITFT è la EN 12697-24 (annesso E); essa rappresenta l'armonizzazione a livello europeo delle normative precedenti su tale tema; in particolare si menziona la norma inglese BSI DD ABF 1997, nella quale la configurazione di carico prevede la disposizione dei due sensori di spostamento in posizione verticale, a contatto con il coltello di carico superiore. La risposta del provino è quindi espressa in funzione dell'accumulo del danno a fatica in direzione verticale.

La macchina in dotazione al Laboratorio di Strade LAS del Dipartimento DICAM dell'Università di Bologna è conforme a tale configurazione (Figura 6.31).

6.3.2.2 Modalità di svolgimento del test

La procedura di prova ha inizio con il condizionamento termico del campione alla temperatura di prova (generalmente 20°C) che può durare diverse ore in funzione della temperatura da raggiungere. Il passaggio successivo è il posizionamento del provino nel dispositivo di prova e quest'ultimo nella struttura di carico, centrato sotto l'attuatore pneumatico. Successivamente i due LVDT per la misura dello spostamento verticale sono opportunamente regolati e collocati sopra il coltello di carico superiore (Figura 6.31).



Figura 6.31: Configurazione di prova ITFT.

Per quanto riguarda la modalità di prova, il dispositivo consente di eseguire test in controllo di tensione. Da recenti sperimentazioni è risultato che le condizioni di carico in controllo di tensione sono generalmente più indicate per materiali bituminosi impiegati in strati di spessore superiore ai 15 cm. Il caso analizzato dal presente studio rientra in tale categoria, poiché riguarda una miscela da impiegare in uno strato profondo della sovrastruttura stradale.

Il livello di stress da applicare al provino è stato definito in funzione della deformazione di trazione iniziale ricercata. Noti i valori dei moduli ITSM, è stato possibile calcolare i valori delle tensioni da applicare ai singoli campioni, dopo aver fissato la deformazione iniziale di target, mediante la relazione:

$$\sigma_t = \frac{\varepsilon_0 \cdot E}{(1 + 3 \cdot \nu)} \quad (6.15)$$

dove

E = modulo di rigidezza;

ν = coefficiente di Poisson, assunto pari a 0.35;

ε_0 = deformazione orizzontale iniziale di target;

σ_t = tensione applicata per ottenere una deformazione orizzontale ε_0 .

Gli impulsi di carico sono caratterizzati da un *peak load*, un *pulse repetition period* ed un *rise time* costanti e preimpostati al momento dell'inizio del test.

6.3.2.3 Parametri di prova

Le impostazioni di prova utilizzate sono riportate nella Tabella 6.7.

IMPOSTAZIONI DI PROVA		
Temperatura di prova	20	°C
Diametro provino	150	mm
Altezza provino	60	mm
Tensione di carico	100-700	kPa
Rise time	124	ms
Pulse repetition period	1500	ms
Massima deformazione verticale	9	mm
Coefficiente di Poisson	0.35	-

Tabella 6.7: Parametri di configurazione del test ITFT.

Il valore della tensione è stato scelto in funzione della deformazione di trazione iniziale tramite l'equazione (6.15). Le deformazioni iniziali sono state considerate nell'intervallo 100-400 $\mu\varepsilon$; in particolare i tre livelli di deformazione iniziale scelti sono stati: 110, 140 e 175 $\mu\varepsilon$. Per ciascun livello di stress e per ciascuna tipologia di miscela sono state eseguite almeno tre prove su campioni distinti.

La prova è terminata al raggiungimento della rottura fisica del provino o della deformazione verticale massima. Per tutti i provini si è registrata una rottura completa del campione in due parti rispetto al diametro verticale e l'aliquota di deformazione permanente è risultata trascurabile, ossia il materiale non ha sofferto un accumulo evidente di tale deformazione, prima della rottura.

6.3.3 CURVE DI FATICA

In questo paragrafo sono illustrati i risultati delle prove di resistenza a fatica in configurazione di trazione indiretta ITFT. I dati dei test sono riportati nei grafici seguenti, dove sull'asse delle ascisse si ha il numero di cicli a rottura per i diversi provini e sull'asse delle ordinate sono indicate le deformazioni iniziali a cui è stato sottoposto il campione; entrambe le scale sono logaritmiche. Dall'insieme dei punti relativi a ciascuna tipologia di miscela è pertanto possibile ricavare le curve di fatica di Wöhler, rappresentate dalle linee di interpolazione, come descritto nel paragrafo 6.3.1.1.

La Figura 6.32 e la Figura 6.33 riportano le leggi di fatica per i provini con il 3.5% di emulsione di bitume, confrontando le resistenze sviluppate con e senza il polverino di gomma TCR e CCR. La Figura 6.34 e la Figura 6.35 riportano le leggi di fatica per i provini con il 5.0% di emulsione di bitume, confrontando le resistenze sviluppate con e senza il polverino di gomma TCR e CCR.

La Figura 6.36 e la Figura 6.37 riportano la comparazione tra le curve di resistenza a fatica dei provini tradizionali TCR e criogenici CCR contenenti rispettivamente 3.0% e 1.5% di cemento.

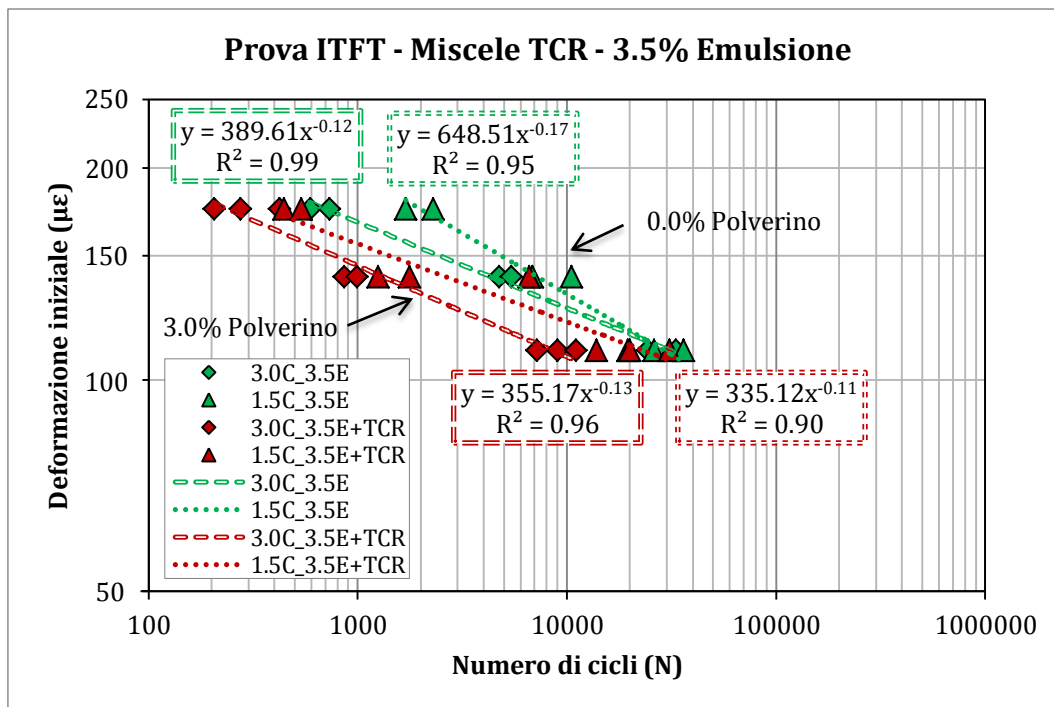


Figura 6.32: Leggi di fatica di Wöhler. Miscele con 3.5% emulsione. Polverino criogenico TCR.

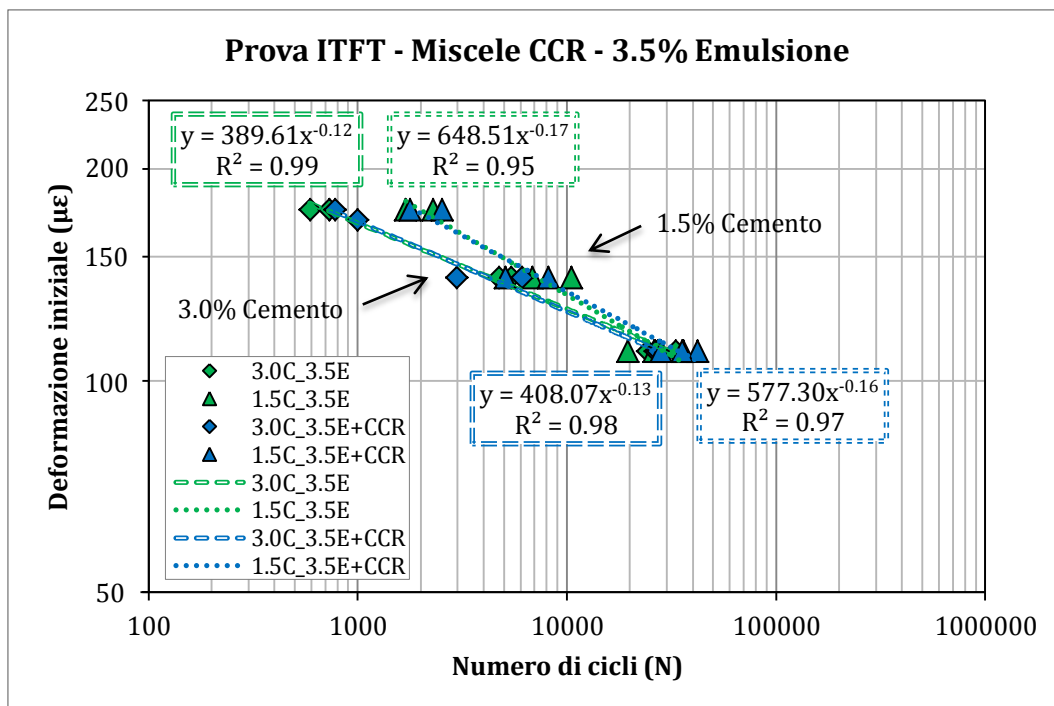


Figura 6.33: Leggi di fatica di Wöhler. Miscele con 3.5% emulsione. Polverino criogenico CCR.

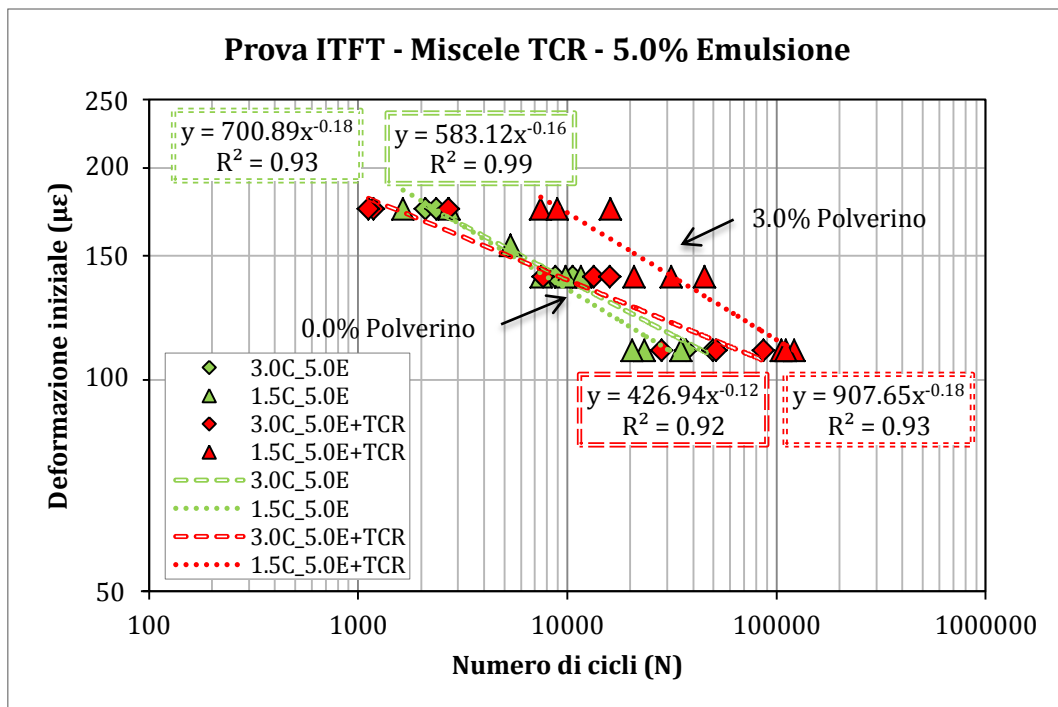


Figura 6.34: Leggi di fatica di Wöhler. Miscela con 5.0% emulsione. Polverino criogenico TCR.

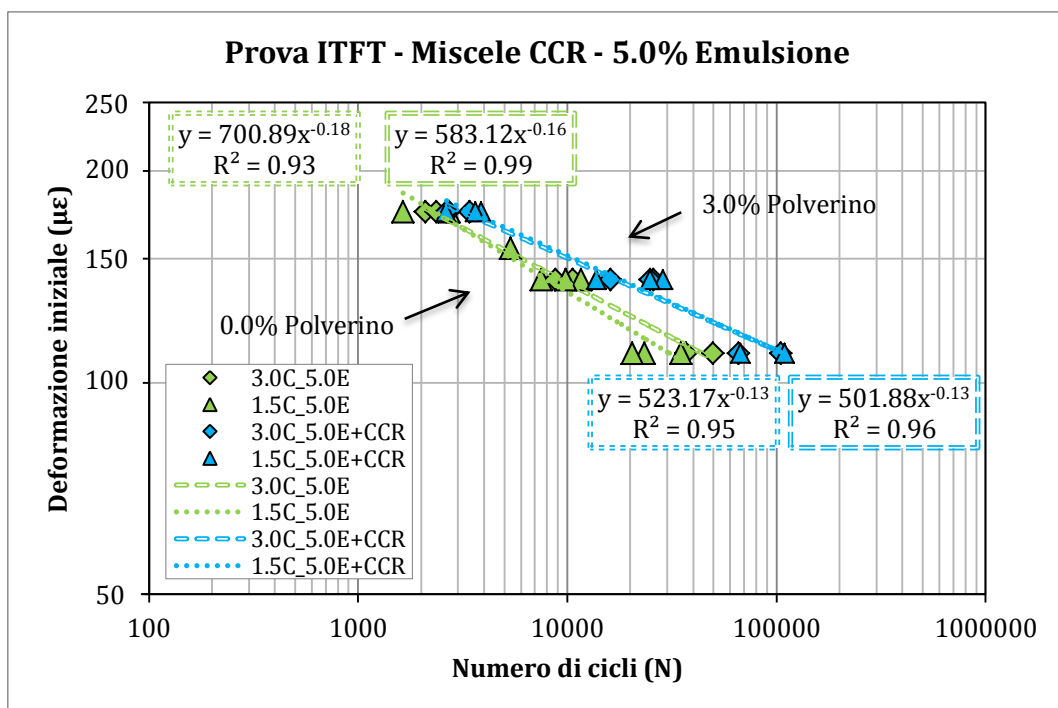


Figura 6.35: Leggi di fatica di Wöhler. Miscela con 5.0% emulsione. Polverino criogenico CCR.

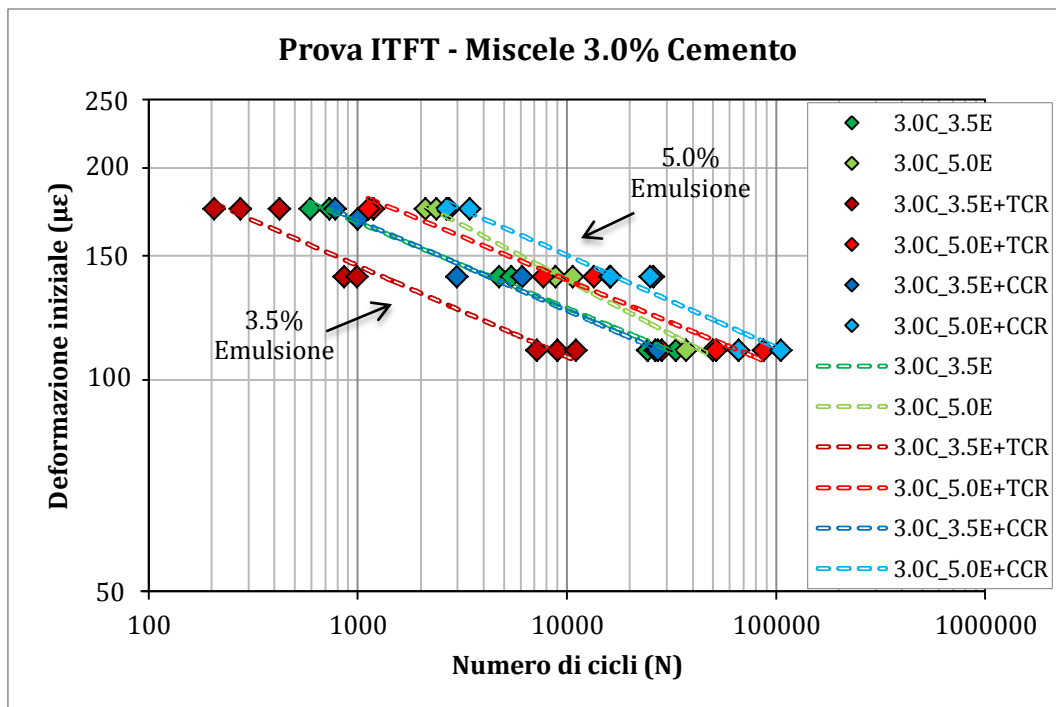


Figura 6.36: Leggi di fatica di Wöhler. Miscele con 3.0% cemento. Polverino TCR e CCR.

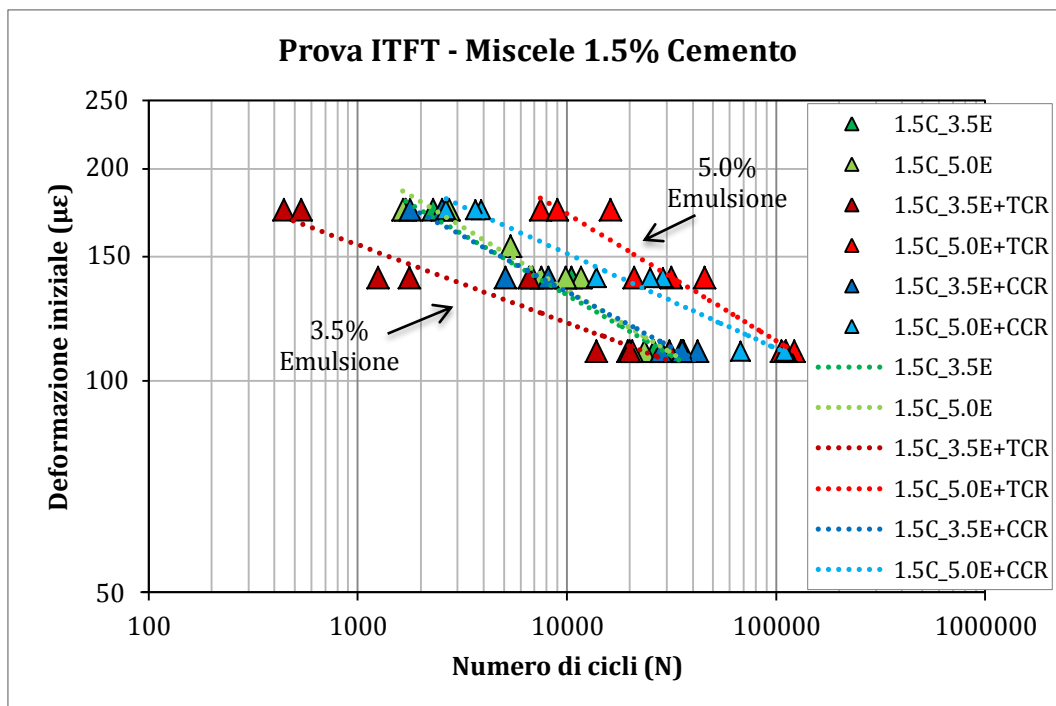


Figura 6.37: Leggi di fatica di Wöhler. Miscele con 1.5% cemento. Polverino TCR e CCR.

Dall'analisi dei grafici si evidenziano i contributi forniti dai diversi elementi della miscela alla resistenza a fatica dei campioni.

Il cemento produce una riduzione della resistenza a fatica del materiale. A parità di tutte le altre caratteristiche, infatti, il passaggio da una percentuale di 1.5% a 3.0% di cemento determina uno spostamento delle curve verso sinistra, ossia ad uno stesso livello tensionale e deformativo imposto corrisponde un numero di cicli a rottura inferiore. Lo scostamento tra le curve è più marcato nelle miscele meno ricche di emulsione di bitume. L'andamento evidenziato è perfettamente in linea con le proprietà di irrigidimento strutturale attribuibili al cemento; quest'ultimo caratterizza il campione con un comportamento di tipo fragile che non garantisce nessuna resistenza meccanica residua, una volta superato il carico limite e provoca la spaccatura del provino molto rapidamente, una volta innescata la fessurazione.

Il ruolo dell'emulsione bituminosa è quello di fornire duttilità alla struttura; il bitume ha un campo di deformazione più ampio di quello del cemento e, una volta superato il carico limite, che definisce il passaggio dal comportamento elastico a quello viscoso, esso subisce una progressiva diminuzione delle proprietà, continuando però a sviluppare delle riserve residue di resistenza. Nella pratica si può ipotizzare che, al raggiungimento di una prefissata deformazione totale subita dal provino, venga meno dapprima il contributo dei legami idraulici e solo successivamente il contributo di quelli bituminosi. È evidente che un maggiore tenore di legante organico tenda a condizionare favorevolmente la durata della prova di fatica, aumentando i numeri di cicli necessari a raggiungere la rottura. Ciò si osserva con molta chiarezza nella Figura 6.36 e nella Figura 6.37. Per entrambe le tipologie di polverino utilizzato e a parità di dosaggio di cemento, i campioni più ricchi di

emulsione sono infatti posizionati nella parte più a destra dei grafici, il che presuppone un numero di cicli a rottura superiore per i diversi livelli tensionali e deformativi imposti.

La presenza e il ruolo del polverino di gomma all'interno dei campioni sono fortemente interconnessi al dosaggio caratteristico di emulsione di bitume. I grafici in Figura 6.32 e Figura 6.33 evidenziano che per miscele con 3.5% di emulsione l'aggiunta di polverino di gomma non contribuisce a incrementare la vita utile del materiale. Le rette che descrivono la resistenza a fatica dei provini con il 3.0% di polverino (TCR) si collocano nella parte sinistra dei grafici rispetto alle corrispondenti curve con 0% di gomma o, nel migliore dei casi si trovano a queste ultime praticamente sovrapposte (CCR). Se si osservano, invece, i grafici in Figura 6.34 e Figura 6.35 si nota un aumento netto della resistenza a fatica dei materiali con l'aggiunta del polverino di gomma; le curve dei provini traslano verso destra e presentano una pendenza tendenzialmente inferiore. In questo caso il contributo elastico fornito dalla gomma, unitamente alle doti di duttilità dell'emulsione, risulta vantaggiosamente utilizzabile per assorbire parte dell'energia derivante dal ripetersi dei carichi e per prolungare la vita utile del campione. Nel caso precedente, al contrario, la deformabilità del polverino interviene in maniera peggiorativa, o al limite ininfluente, sulla matrice legante già di per sé caratterizzata da una flessibilità inferiore.

Per ciascuna tipologia di miscela è stato determinato il modello di fatica lineare e sono state calcolate le equazioni con il coefficiente di regressione R^2 ; tali relazioni matematiche sono riportate in Tabella 6.8. In particolare, basandosi sui modelli a fatica calcolati, è stato possibile estrapolare anche la deformazione ϵ_6 a seguito di un

milione di cicli di carico (1E+06 cicli) e il numero di sollecitazioni che condurrebbero a rottura i diversi provini, in corrispondenza di un livello deformativo iniziale ϵ_0 equivalente a 100 $\mu\epsilon$. I valori confermano che l'aggiunta di polverino di gomma nelle miscele con 5.0% di emulsione bituminosa incrementa notevolmente la vita utile del materiale, mentre non si registrano variazioni positive nelle miscele con il dosaggio di 3.5%. Nel primo caso i valori di ϵ_6 si attestano intorno a 80 $\mu\epsilon$ per miscele con polverino e intorno a 60 $\mu\epsilon$ per quelle senza. La riduzione della pendenza delle linee di interpolazione all'aumentare del cemento è sinonimo del cambiamento delle caratteristiche della miscela, dovuto proprio a tale componente. I valori di R^2 indicano una buona interpolazione dei modelli di regressione lineare. La Figura 6.38, Figura 6.39, Figura 6.40 e Figura 6.41 sono dedicate al confronto tra i risultati di prova con polverino tradizionale TCR e criogenico CCR.

MISCELA	EQUAZIONE	R2	ϵ_6 1E+06 cicli	Numero cicli a 100 $\mu\epsilon$
3.0C_3.5E	$y = 389.61x^{-0.122}$	0.99	72	69379
3.0C_3.5E+TCR	$y = 355.17x^{-0.129}$	0.90	60	18490
3.0C_3.5E+CCR	$y = 408.07x^{-0.128}$	0.98	70	59070
3.0C_5.0E	$y = 583.12x^{-0.156}$	0.99	68	81041
3.0C_5.0E+TCR	$y = 426.94x^{-0.122}$	0.92	79	146873
3.0C_5.0E+CCR	$y = 501.88x^{-0.131}$	0.96	82	222890
1.5C_3.5E	$y = 648.51x^{-0.173}$	0.95	59	49336
1.5C_3.5E+TCR	$y = 335.12x^{-0.111}$	0.90	72	53893
1.5C_3.5E+CCR	$y = 577.30x^{-0.159}$	0.97	64	61474
1.5C_5.0E	$y = 700.89x^{-0.179}$	0.93	59	53003
1.5C_5.0E+TCR	$y = 907.65x^{-0.180}$	0.93	75	209782
1.5C_5.0E+CCR	$y = 523.17x^{-0.135}$	0.95	81	210514

Tabella 6.8: Equazioni leggi a fatica. ϵ a 1E+06 cicli. Cicli a 100 $\mu\epsilon$.

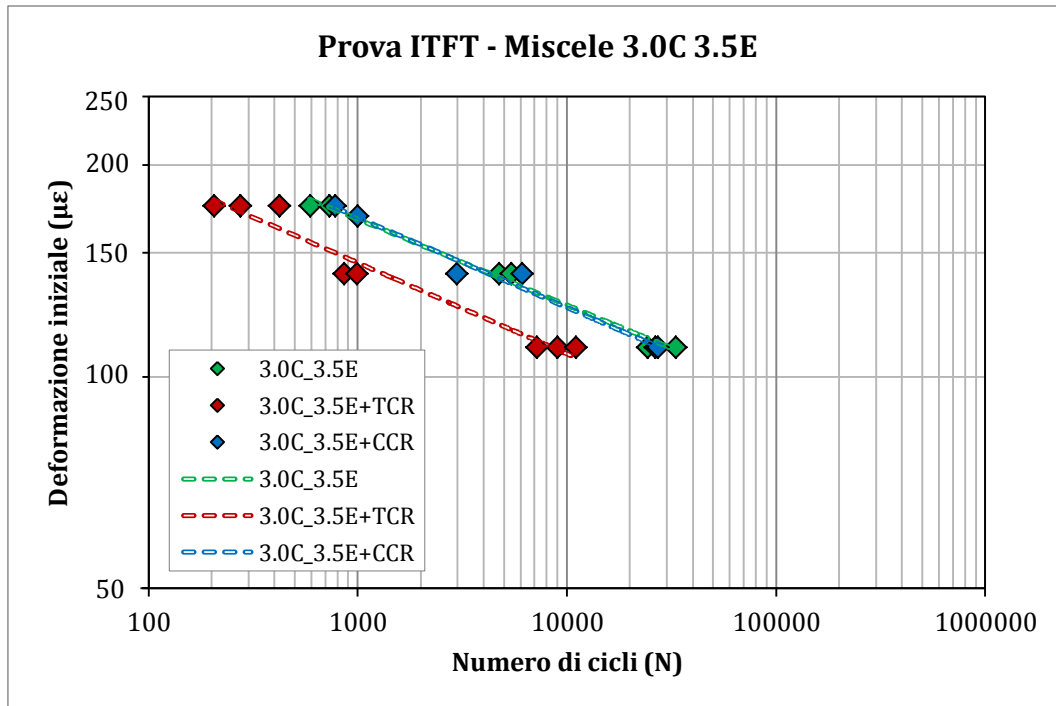


Figura 6.38: Leggi di fatica di Wöhler. Miscela con 3.0% cemento e 3.5% emulsione.

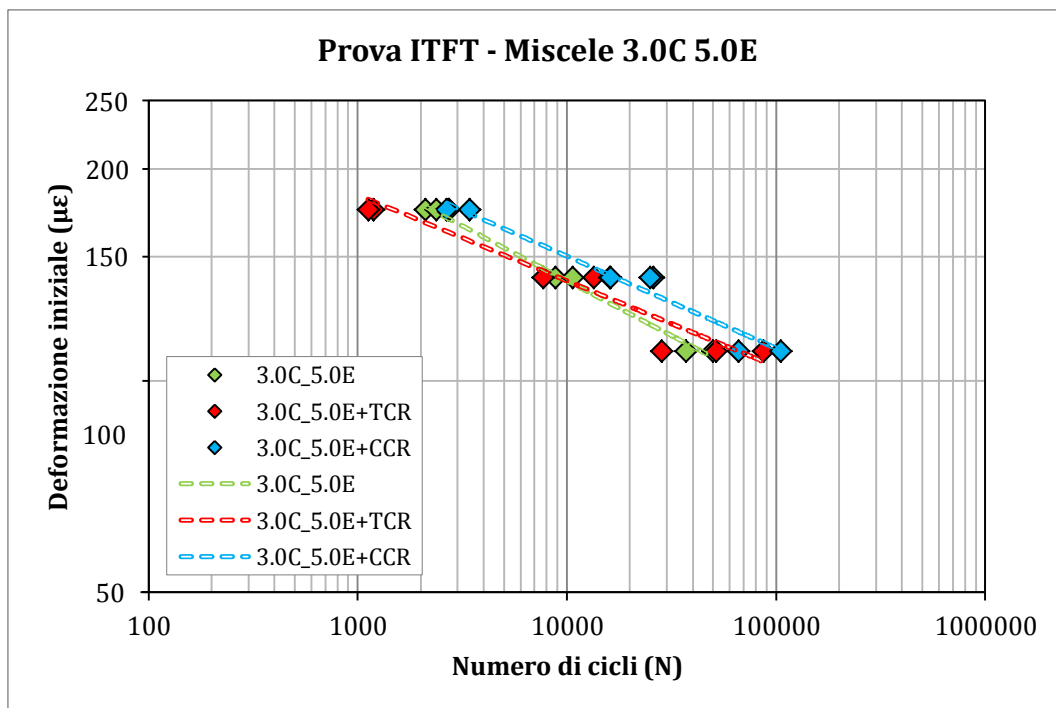


Figura 6.39: Leggi di fatica di Wöhler. Miscela con 3.0% cemento e 5.0% emulsione.

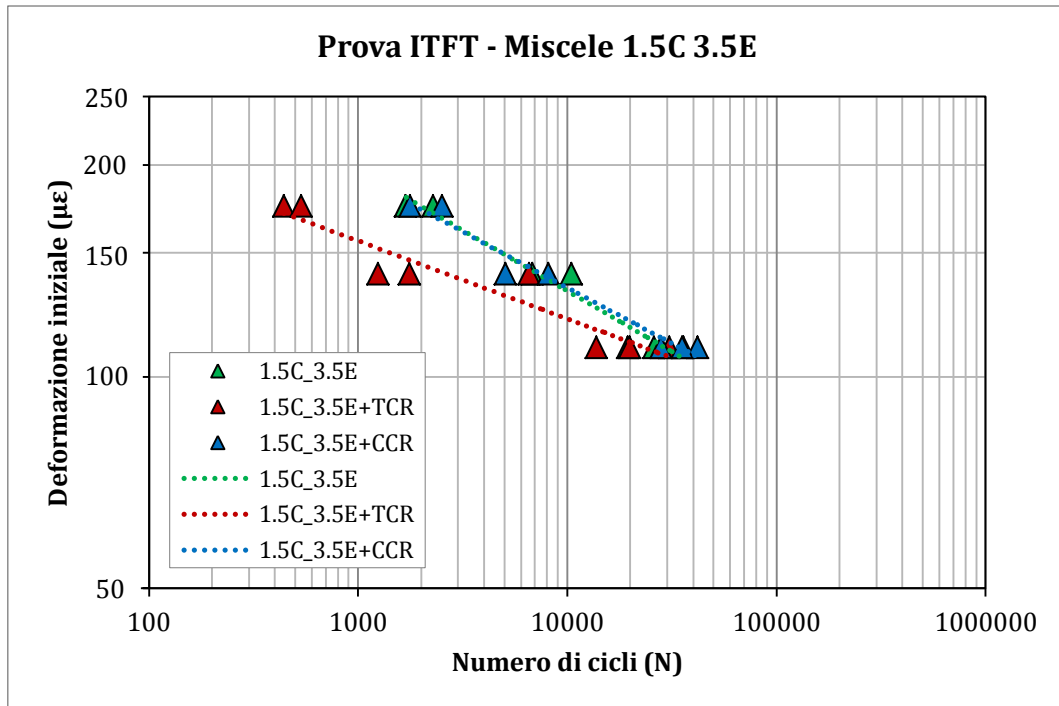


Figura 6.40: Leggi di fatica di Wöhler. Miscela con 1.5% cemento e 3.5% emulsione.

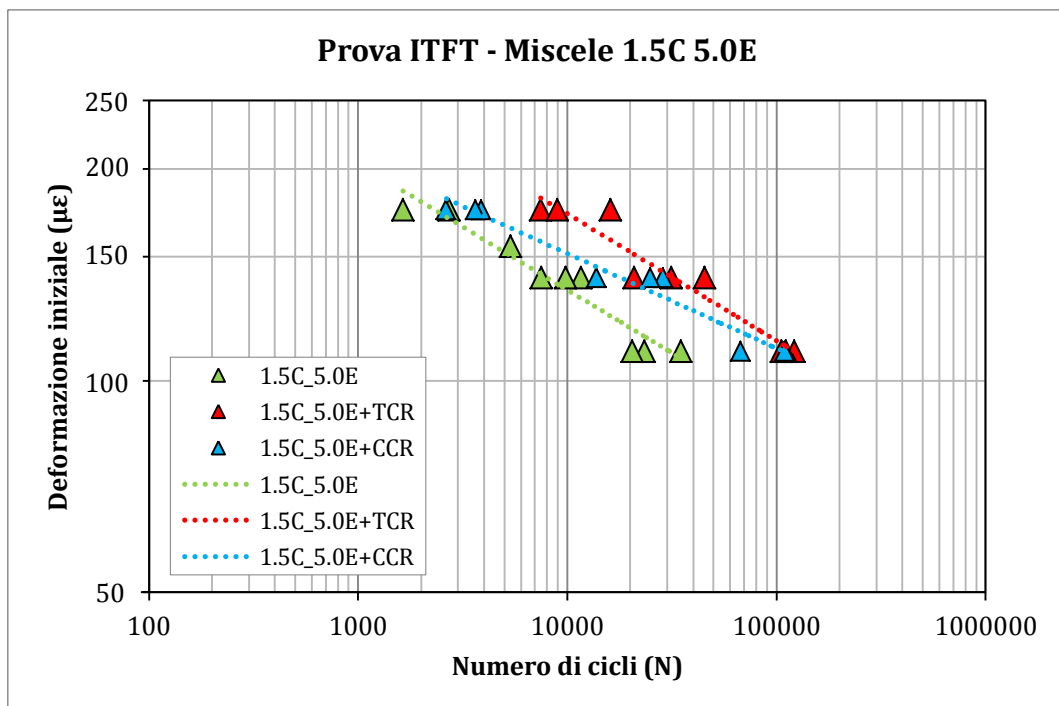


Figura 6.41: Leggi di fatica di Wöhler. Miscela con 1.5% cemento e 5.0% emulsione.

Dai grafici in Figura 6.38 e Figura 6.40 riportati sopra si evidenzia che per le miscele contenenti minore tenore di emulsione di bitume (3.5%), i risultati ottenuti con il polverino tradizionale TCR risultano essere peggiorativi in termini di resistenza a fatica. Ciò si evidenzia con una traslazione della curva di regressione verso sinistra in entrambi i casi: 3.0% e 1.5% di cemento e nel secondo si ha una riduzione di pendenza della linea di regressione. L'aggiunta del polverino criogenico CCR, invece, fornisce risultati del tutto confrontabili con quelli delle miscele che non contengono gomma, sia in termini di pendenza sia di cicli a rottura, presentando linee di interpolazione sovrapposte a quelle dei provini con CR0%. Per le miscele con un tenore del 3.5% di emulsione e con percentuali di 3.0% e 1.5% di cemento, l'impiego di polverino criogenico CCR risulta quindi più vantaggioso di quello tradizionale TCR, sebbene non produca miglioramenti in termini assoluti sulla vita utile dei campioni testati.

L'azione positiva dovuta del polverino è, invece, ben evidenziata nei grafici di Figura 6.39 e di Figura 6.41 che rappresentano i campioni contenenti un tenore maggiore di emulsione di bitume (5.0%). In questa circostanza non è possibile determinare una tendenza di comportamento comune per dosaggi di 3.0% e 1.5% di cemento, nella comparazione tra le due tipologie di gomma. Nelle miscele più ricche di legante cementizio (3%), infatti, il polverino criogenico CCR è quello caratterizzato dalle performance migliori a fatica, mentre l'equivalente tradizionale TCR mostra delle riposte in linea con i materiali senza gomma. Nelle miscele contenenti il dosaggio inferiore di cemento (1.5%) non accade la stessa cosa. La linea di regressione rossa è infatti quella che si distingue per la posizione più favorevole, ossia nella parte destra rispetto alle curve corrispondenti. Inoltre essa è caratterizzata da

un maggiore pendenza; ciò implica che, a parità di stato tensionale e deformativo imposto al provino, il materiale presenta le fasi critiche di innesco e propagazione della fessura per fatica, con un certo ritardo rispetto alle equivalenti miscele senza gomma o con polverino di gomma criogenico CCR. In ogni caso, per le miscele con un tenore del 5.0% di emulsione e con percentuali del 3.0% e 1.5% di cemento, l'impiego del polverino (tradizionale o criogenico) produce miglioramenti in termini assoluti sulla vita utile dei campioni testati.

CONCLUSIONI

L'obiettivo della presente analisi sperimentale è stato quello di fornire indicazioni e informazioni in merito all'utilizzo del polverino di gomma, ottenuto dal recupero degli pneumatici fuori uso (PFU), come aggregato all'interno di miscele confezionate tramite tecnica di stabilizzazione a freddo, con emulsione bituminosa e cemento, e contenente il 100% di conglomerato bituminoso di recupero. Dato il carattere profondamente innovativo della ricerca e l'assenza di riferimenti e dati in letteratura, si è reso necessario approcciare il problema partendo da un'analisi preliminare che potesse coglierne le variabili, per passare quindi ad una selezione di secondo livello, incentrata su parametri di tipo prestazionale.

La fase sperimentale di prequalifica ha consentito di inquadrare due fattori fondamentali: il ruolo legante dell'emulsione bituminosa e la composizione granulometrica del polverino di gomma. Questi due elementi non rappresentano variabili indipendenti del problema, anzi sono strettamente collegate tra di loro. Il polverino di gomma è per sua natura un materiale caratterizzato da scarsa adesione superficiale; inoltre, come tutti i polimeri elasticizzati, a seguito della rimozione di

una sollecitazione, manifesta una tendenza al ripristino della configurazione originaria. Questi due fenomeni si evidenziano all'interno delle miscele, determinando una limitata adesione della gomma agli aggregati e al cemento presente e producendo un ritorno elastico al termine del confezionamento del provino.

Con questi presupposti diventa pertanto fondamentale il ruolo dell'emulsione bituminosa. L'azione legante di quest'ultima consente una migliore integrazione del polverino all'interno della matrice del campione; in particolare contenuti superiori di emulsione tendono a mitigare maggiormente i comportamenti della gomma precedentemente menzionati, permettendo una sua maggiore affinità con gli altri elementi, un miglior addensamento e una manifestazione meno accentuata del ritorno elastico. La tendenza è confermata anche dai valori di resistenza a trazione indiretta ITS, parametro di valutazione meccanica scelto per la fase di prequalifica. Provini con polverino che presentano caratteristiche volumetriche più simili a quelli senza polverino restituiscono risultati di prova ITS maggiormente confrontabili con i valori di questi ultimi. L'aumento di emulsione, sebbene comporti una riduzione in termini assoluti delle tensioni di picco, consente l'utilizzo di polverino di gomma nelle miscele, senza che si evidenzino un decadimento eccessivo delle qualità.

L'altro aspetto che si ritiene centrale nell'analisi del problema è la composizione granulometrica del polverino, in termini di confronto tra le due tipologie esaminate. I differenti risultati ottenuti dalle curve di addensamento e dalle prove di resistenza a trazione indiretta sono da addebitare proprio alle differenze granulometriche tra il polverino tradizionale TCR e quello criogenico CCR. Quest'ultimo, con superficie più regolare e con una maggiore percentuale di passante fine, interagisce meglio con la

matrice strutturale del campione, evidenziando minori problemi di ingranamento con gli aggregati e di affinità con la matrice legante, composta da cemento ed emulsione. Ne consegue un grado di addensamento migliorato e una riduzione inferiore dei valori di tensioni massime a rottura ITS.

Naturalmente le variabili menzionate influenzano anche le performance dei materiali, esaminate mediante prove meccaniche di tipo dinamico. Tale caratterizzazione prestazionale si concentra su una selezione delle miscele che considera il 3% come la percentuale limite di utilizzo del polverino, oltre la quale si è dimostrato non tecnicamente ed economicamente vantaggioso spingersi.

Il test per la determinazione del modulo ITSM conferma quanto già rilevato dai valori di resistenza a trazione indiretta ITS, infatti l'introduzione del polverino di gomma riduce la rigidità delle miscele. Il ruolo dei tre elementi principali, cemento, emulsione e gomma si riconferma: il cemento fornisce alla struttura rigidità e un comportamento fragile; l'emulsione incrementa la duttilità, assicurando caratteristiche viscoelastiche alla matrice legante; il polverino, laddove opportunamente integrato e miscelato con i dosaggi ottimali della malta, garantisce una componente con elasticità migliorata. Ne consegue che, per ottenere le migliori prestazioni in termini di rigidità ITSM, in campioni che includano la gomma, sia necessario combinare i dosaggi superiori di legante cementizio e bituminoso: la miscela con 3.0% di cemento e 5.0% di emulsione mostra i risultati più vantaggiosi in tal senso e presenta inoltre valori che sono superiori ai limiti imposti dai capitolati di riferimento in materia di riciclaggio con emulsione bituminosa. Ulteriori osservazioni scaturite dallo studio dei moduli ITSM indicano che l'utilizzo del polverino di gomma

non influenza la sensibilità termica delle miscele, mentre in termini di maturazione esso tende a velocizzare il raggiungimento della rigidità finale caratteristica del provino. Quest'ultima proprietà potrebbe risultare di grande interesse applicativo per quanto riguarda i tempi di apertura al traffico al termine delle attività di lavorazione in sito. A livello comparativo il polverino criogenico CCR, per le sue caratteristiche superficiali e granulometriche, si contraddistingue nuovamente rispetto a quello tradizionale TCR.

Le proprietà elastiche del polverino di gomma trovano un impiego vantaggioso nell'incremento della resistenza a fatica e della durata della vita utile dei campioni. Ciò è verificato nei casi in cui la miscela di bitume, cemento e polverino presenti bassi contenuti di legante cementizio (1.5%) irrigidente e dosaggi alti di legante bituminoso (5.0%). Tale combinazione fornisce una flessibilità superiore alla malta, garantendo una componente di deformazione reversibile maggiore e un intervallo più ampio di resistenza alle sollecitazioni cicliche. I mastici con dosaggi differenti, in particolare meno ricchi di emulsione di bitume (3.5%), non evidenziano lo stesso comportamento e in questi casi l'aggiunta di polverino è ininfluenza (CCR), o addirittura negativa (TCR), ai fini della resistenza a fatica.

In conclusione, la presente ricerca ha consentito di stabilire che il polverino di gomma da PFU può essere vantaggiosamente sfruttato per il confezionamento di materiali stabilizzati a freddo con emulsione bituminosa e cemento. Tale utilizzo non può prescindere, però, da una corretta fase di progettazione della miscela e da un'approfondita indagine sperimentale.

La sperimentazione ha dimostrato che particolare attenzione deve essere

rivolta alle seguenti variabili del problema:

- composizione granulometrica del polverino di gomma;
- percentuale ottimale del polverino di gomma;
- ottimizzazione del dosaggio di emulsione e mastice cemento-bitume;
- grado di addensamento ed energia di compattazione;
- impatto economico.

Granulometrie più fini di polverino sembrano essere più indicate per un utilizzo del materiale, in sostituzione parziale dell'aggregato nelle miscele riciclata a freddo; la tipologia ottenuta tramite macinazione criogenica ha restituito, infatti, risultati più performanti. Per vagliare se tale differenza sia dovuta al tipo di lavorazione o, piuttosto, alla sola dimensione delle particelle è opportuno procedere con ulteriori approfondimenti.

Il dosaggio ottimale di polverino è strettamente correlato alla composizione granulometrica. I dati ottenuti dal materiale tradizionale, più grossolano, ne suggeriscono infatti l'impiego in percentuali inferiori.

L'affinità tra polverino di gomma ed emulsione implica che particolare attenzione deve essere rivolta all'affinamento del tenore di legante bituminoso all'interno del mastice, in funzione delle variabili già citate. Parimenti il dosaggio di cemento deve essere valutato in funzione delle caratteristiche di rigidità che deve possedere la miscela in esercizio.

La percentuale dei vuoti e il grado di addensamento finale influiscono notevolmente su tutte le caratteristiche fisiche e meccaniche del campione. Selezionare l'energia di compattazione più adeguata è una condizione importante che consente di sfruttare al meglio le proprietà peculiari della miscela.

In ultimo, una valutazione completa non può prescindere da un'attenta stima di costi e benefici. L'impatto economico che una lavorazione o l'altra del polverino ha sul costo complessivo del prodotto, in relazione alla quantità impiegata, devono essere vagliati congiuntamente ai benefici prestazionali e di smaltimento dello stesso. L'incentivo all'utilizzo non può escludere un vantaggio economico.

L'ulteriore approfondimento e l'affinamento degli aspetti focalizzati rappresentano il punto chiave, affinché sia incoraggiato l'impiego del polverino di gomma in combinazione con la tecnica di riciclaggio a freddo esaminata. Le osservazioni e le analisi non vogliono essere esaustive del problema esaminato, ma intendono fornire utili spunti di riflessione sui quali avviare nuovi studi in proposito, per un stimolo ad una costruzione ecocompatibile ed ecosostenibile.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rapisarda Sassoon C., Anghinelli S., Feller F., Ferrero D. *Per uno sviluppo durevole e sostenibile*. Network Sviluppo Sostenibile, 2005.
- [2] Scientific Applications International Corporation (SAIC). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. National Risk Management Research Laboratory, Office Of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2006.
- [3] Timothy T. Miller, Hussain U. Bahia. *Sustainable Asphalt Pavements: Technologies, Knowledge Gaps and Opportunities*. Prepared for the Modified Asphalt Research Center (MARC). Part of the Asphalt Research Control (ARC). February, 2009.
- [4] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). *Rapporto Rifiuti Speciali*. Febbraio, 2012.
- [5] Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile. FISE UNIRE Unione Nazionale Imprese Recupero. *L'Italia del Riciclo 2012*. Parte 1-2-3. 2012.
- [6] Fischer, Werge et al. *EU as a Recycling Society Present recycling levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the EU*. ETC/SCP working paper 2/2009. April 2009.
- [7] Antonini E., Costa A., Perrotta A. *Demolire per riciclare: strumenti e procedure*

per la valorizzazione dei rifiuti da costruzione e demolizione. Convegno Internazionale Crolli e Affidabilità delle Strutture Civili, Università degli Studi di Napoli Federico II. Napoli, 15-16 maggio 2003.

[8] European Commission, Directorate-General Environment, DG ENV.E.3. *Management of Construction and Demolition Waste, Working Document N°1*. 4 April 2000.

[9] Nicosia S., Lucchese A., Rizzo G., Ercoli L. *Riciclo di Rifiuti da Demolizione: un Contributo all'Ecobilancio*, Proc. of the IV European Waste Forum, Innovation in Waste Management, C.I.P.A. Ed., Milan, Italy, Vol. 1, pp. 399-414, 2000.

[10] BIO Intelligence Service. *Service Contract on Management of Construction and Demolition Waste - Sr1*. Final Report Task 2. European Commission (DG ENV). ENV.G.4/FRA/2008/0112. February 2011.

[11] EAPA – European Asphalt Pavement Association. *Arguments to stimulate the government to promote asphalt reuse and recycling*. EAPA, 2008.

[12] Mazza, G.D. *I rifiuti da cantiere edilizio: possibilità di riciclaggio*. RS-Rifiuti Solidi, anno VII- numero 6, nov-dic 1993. Citazione Rigamonti E. *Dati quantitativi e qualitativi sulla produzione di rifiuti da C&D*. La gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione; Istituto per l'Ambiente, Milano, 1995 (Rapporto 95/02).

[13] Iacuzzi R., *Gestione di rifiuti speciali, materiali recuperabili nella realizzazione di infrastrutture viarie*, AIAT.

[14] Ravaioli S. *Reclaimed asphalt: waste or by-product?*. Rassegna del bitumen, 69-11, 2011.

[15] Bergonzoni M. *Valorizzazione dei pneumatici fuori uso (PFU) attraverso il recupero e riciclaggio per la produzione di prodotti innovativi*. Tesi di Dottorato di

Ricerca in "Scienze dell'Ingegneria", ciclo XXII, Università di Ferrara. 2009.

[16] Canestrari F. *L'impiego di pneumatici fuori uso nelle pavimentazioni stradali*. Supplemento ARPA Rivista N. 6 novembre-dicembre 2009.

[17] Valagussa S. *Pavimentazioni stradali: indagine sulle tecnologie di riciclaggio a freddo e sui conglomerati bituminosi tiepidi*. Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, 2010.

[18] Wirtgen Group. *Manuale riciclaggio a freddo*. Wirtgen, seconda edizione Novembre, 2004.

[19] Bocchi L., De Ferraris L., Festa B., Peroni G. *Tecniche di riciclaggio, manutenzione e rafforzamento delle pavimentazioni: innovazioni, sperimentazioni e tendenze*. AIPCR, XXIII Convegno Nazionale Stradale, Verona, 18-21 Maggio, 1998.

[20] Associazione mondiale della strada - AIPCR, Comitato Tecnico C 4.3, *Pavimentazioni Stradali. Tecniche e aspetti normativi del riciclaggio nelle pavimentazioni stradali*. XXV Convegno Nazionale Stradale, Napoli, 4-7 Ottobre 2006.

[21] SITEB, 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.

[22] SITEB, Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade. *Emulsioni bituminose: applicazioni, suggerimenti e note tecniche*. Prima edizione, Settembre 2004.

[23] Bragaglia M. *La marcatura CE degli aggregati per conglomerati bituminosi*. Strade & Autostrade, 4-2004.

[24] *Asphalt Emulsion Technology*. Transportation Research Circular Number E-C102, August 2006.

[25] AEMA - Asphalt Emulsion Manufacturers Association & Asphalt Institute. A

basic asphalt emulsion manual. Manual serial number n.19, revised 1 March 2004.

[26]

[27] Muncy S. G. *Cold in-place recycling practices in North America*. Eurasphalt & Eurobitume 1993, pp.885-889, Stoccolma, 16-18 Giugno 1993.

[28] Kearney. *Cold mix recycling: state of the practice, asphalt paving technology*. vol.66, UTHA, 1997.

[29] AIPCR. *Modified binders, binders with additives and special bituminous*. Routes-Roads n.303, Marzo 1999.

[30] Convezione di ricerca tra Università di Parma, dipartimento DICAtEA, e VALLI ZABBAN S.p.A. *Valutazione del ruolo del legante sulla resistenza a fatica di conglomerati bituminosi riciclati a freddo con emulsione bituminosa e cemento*.

[31] Montepara A. *La valutazione del ruolo del legante sulla resistenza a fatica dei misti cementati contenenti fresato stradale, emulsioni bituminose e bitume schiumato*. Strade & Autostrade, 6-2008.

[32] Santagata E., Chiappinelli G., *L'influenza del tipo di emulsione sulle caratteristiche volumetriche e meccaniche di conglomerati bituminosi riciclati a freddo*. XI Convegno SIV, Verona, 2001.

[33] 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 SIV, Verona, 2001.

[34] Santagata E., Chiappinelli G. *Valutazione Comparativa di Emulsioni Bituminose Modificate per il Riciclaggio a Freddo dei Conglomerati Bituminosi Stradali*. XII Convegno Internazionale della Società Italiana Infrastrutture Viarie, 30-31 ottobre 2002, Vol. 2, pagine da 390 a 408.

-
- [35] Brown S., Needham D. *Study of cement modified bitumen emulsion mixture*. AAPT, Volume n.69, Reno, U.S.A, 2000.
- [36] Jacobson T., Hornwall F., *Cold recycling of asphalt pavement-mix in plant*, Eurasphalt & Eurobitume 2000, Barcelona, vol.2, 20-22 September 2000, pp.260-267.
- [37] Hanzik Š., Hanzic V., *A contribution to applications of used asphalt mixtures by cold techniques*, Eurasphalt & Eurobitume 2000, Barcelona, vol.2, 20-22 September 2000. pp.218-221.
- [38] Simone A., Bonini A., Sangiorgi C., *The influence of Portland cement on cold-mix asphalt recycling*. International Symposium on Subgrade Stabilisation and In Situ Pavement Recycling Using Cement, 1st. Salamanca, Spain, 2001.
- [39] Oulahana D., Zizi Z., Benhassaine A. *Bitumen Emulsion-cement: Hydraulic reactivity and breaking of the emulsion*. Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1996.
- [40] Montepara A., Giuliani F. *The role of cement in the recycling of asphalt pavement cold-stabilized with bituminous emulsions*. Second International Symposium On Maintenance And Rehabilitation Of Pavements And Technological Control, July 29-August 1, Auburn, Alabama, USA, 2001.
- [41] Pereira P., Picado-Santos L. *Technical–economical evaluation of pavement recycling alternatives*. Proceedings of the 3rd gulf conference on road, Oman, 2006.
- [42] Rode F., Weinert F. *Cold placing in asphalt road construction*. Eurasphalt & Eurobitume, Stoccolma, 1993, pp.298-301.
- [43] Cooper K.E., Brown S.F. *Development of simple apparatus for the measurement of the mechanical properties of asphalt mixes*. Proceedings of Eurobitume symposium, Madrid, Spain; 1989.
- [44] Di Benedetto H., Francken L., De La Roche C. *Fatigue of bituminous mixtures*:

different approaches and RILEM interlaboratory tests. Mechanical Tests for Bituminous, RILEM, 1997.

[45] Collop A., Read J. M., *Practical fatigue characterization of bituminous paving mixtures.* Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists n. 66, USA, 1997.

[46] Jenkins K.J., van de Ven M.F.C., Molenaar A.A.A., de Groot J.L.A. *Performance Prediction of Cold Foamed Bitumen Mixes.* Ninth International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen, Denmark. pp16, 2002.

[47] Hurley G.C., Prowell B.D. *Evaluation of Evotherm for use in Warm Mix Asphalt.* Report NCAT 06-02. National Centre for Asphalt Technology, Auburn University, USA, 2006.

[48] Collings D.C. *Experiences Gained from Ten Years of Pavement Rehabilitation by In Situ Recycling with Cement and Combinations of Cement/Bituminous Stabilizing Agents.* International Symposium on Subgrade Stabilisation and In Situ Pavement Recycling Using Cement, 1st. Salamanca, Spain, 2001.

[49] Jenkins K.J., 1994. *Analysis of the performance of a pavement layer which has been treated by single pass in situ stabilization.* MSc (Eng) Thesis, University of Natal, South Africa.

[50] Thanaya I. N. A., Zoorob S. E., Forth J. P. *A laboratory study on cold-mix, cold-lay emulsion mixtures.* Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport 162, February 2009, Pages 47–55.

[51] Yongjoo Kim, A.M., Soohyok Im, Hosin Lee. *Impacts of Curing Time and Moisture Content on Engineering Properties of Cold In-Place Recycling Mixtures Using Foamed or Emulsified Asphalt.* Journal Of Materials In Civil Engineering, May 2011.

[52] Yongjoo Kim, Hosin Lee. *Influence of Reclaimed Asphalt Pavement Temperature*

on Mix Design Process of Cold In-Place Recycling Using Foamed Asphalt. Journal Of Materials In Civil Engineering, July 2011.

[53] Oke O.L., Parry T., Thom N.H. *Assessment of Water and Temperature Susceptibilities of Cold Recycled Bituminous Emulsion Mixtures Using the NAT in the ITSM Mode of Texting*. 5th International SIV Congress SIV 2012 - Sustainability of Road Infrastructures, Rome, 2012.

[54] Bocci M., Grilli A., Cardone F., Graziani A. *A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials*. Construction and Building Materials, 2011.

Riferimenti normativi

[55] 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.

[56] Decreto Legislativo 3 Aprile 2006 n.152. Norme in materia ambientale, supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale, 14/04/2006.

[57] Autostrada del Brennero S.p.A. *Capitolato Speciale D'appalto. Parte Seconda, Prescrizioni Tecniche*. 2008.

[58] Autostrade per l'Italia S.p.A. *Manutenzione E Costruzione Delle Pavimentazioni. Norme Tecniche D'appalto Prestazionali*. Edizione 2004.

[59] ANAS S.p.A. *Capitolato Speciale D'appalto. Parte 2^a Norme tecniche. Pavimentazioni stradali/autostradali*. IT.CDGT.C.05.16 - Rev. 2009.

[60] EN 933-1. Tests for geometrical properties of aggregates - Determination of particle size distribution - Sieving method.

[61] EN 933-2. Tests for geometrical properties of aggregates - Determination of

particle size distribution - Test sieves, nominal size of apertures.

[62] EN 933-3. Tests for geometrical properties of aggregates - Determination of particle shape of aggregates - Flakiness index.

[63] EN 933-4. Tests for geometrical properties of aggregates - Determination of particle shape of aggregates - Shape index.

[64] EN 933-5. Tests for geometrical properties of aggregates - Determination of percentage of crushed and broken surfaces in coarse aggregate particles

[65] EN 933-6. Tests for geometrical properties of aggregates - Assessment of surface characteristics - Flow coefficient of aggregates.

[66] EN 1097-1. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Determination of the resistance to wear (micro-Deval).

[67] EN 1097-2. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Methods for the determination of resistance to fragmentation.

[68] EN 1097-3. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Determination of loose bulk density and voids.

[69] EN 1097-6. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption.

[70] EN 1097-7. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 7: Determination of the particle density of filler - Pyknometer method.

[71] EN 1097-8. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Determination of the polished stone value.

[72] EN 1097-9. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Determination of the resistance to wear by abrasion from studded tyres - Nordic test.

[73] EN 1367-1. Tests for thermal and weathering properties of aggregates -

Determination of resistance to freezing and thawing

[74] EN 1367-2. Tests for thermal and weathering properties of aggregates - Magnesium sulphate test.

[75] EN 1367-3. Tests for thermal and weathering properties of aggregates - Boiling test for "Sonnenbrand" basalt.

[76] EN 12697-5. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density.

[77] EN 12697-6. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens.

[78] EN 12697-8. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the air voids content of bituminous materials.

[79] EN 12697-9. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the reference density, gyrator compactor.

[80] EN 12697-10. Bituminous Mixture - Test method for hot mix asphalt - Part 10: Compactability.

[81] EN 12697-11. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 11. Determination of the compatibility between aggregate and bitumen

[82] EN 12697-23. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.

[83] EN 12697-24. Bituminous Mixture - Test method for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue.

[84] EN 12697-26. Bituminous Mixture - Test method for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness.

[85] EN 12697-31. Bituminous Mixture - Test method for hot mix asphalt - Part 31:

Specimen preparation by gyratory compactor.

[86] EN 13043. Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas.

[87] EN 13108-8. Bituminous mixtures - Material specifications - Part 8: Reclaimed asphalt.