

Università Politecnica delle Marche



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

Analisi prestazionale di conglomerati bituminosi contenenti polverino da PFU

“Performance evaluation of Hot Mix Asphalt containing crumb rubber”

RELATORE:

Prof. Maurizio Bocci

CORRELATORE:

Ing. Emiliano Prospero

TESI DI LAUREA DI:

Christian Delle Monache

Anno Accademico 2020-2021

SOMMARIO

INTRODUZIONE	4
CAPITOLO 1: Stato dell'arte	5
1.1 Definizione e funzione delle pavimentazioni stradali	5
1.2 Conglomerati bituminosi	8
1.3 Aggregati lapidei	9
1.4 Leganti idrocarburici organici	10
1.5 Bitume tradizionale	11
1.6 Bitume modificato	20
1.7 Asphalt rubber	28
1.8 Impianti di produzione	38
CAPITOLO 2: Programma sperimentale	42
2.1 Obbiettivi	42
2.2 Materiali utilizzati	43
2.3 Produzione dei provini	44
2.4 Analisi volumetriche	48
2.5 Prova di modulo a trazione indiretta (ITSM)	50
2.6 Prova di trazione indiretta (ITS)	58
2.7 Prova di fatica (ITF)	62
CAPITOLO 3: Risultati	65
3.1 Risultati caratteristiche volumetriche	65
3.2 Confronto delle analisi volumetriche	68
3.3 Prova di modulo e di rottura a trazione indiretta	69
3.4 Confronto dei risultati dei moduli a trazione indiretta (ITSMm)	70
3.5 Confronto dei risultati della rottura a trazione indiretta (ITS)	71
3.6 Risultati prova di fatica (ITF)	73
3.7 Confronto dei risultati delle prove di fatica	74
CONCLUSIONI	75
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	76

INTRODUZIONE

Con il termine pavimentazione stradale si indica sinteticamente la sovrastruttura interessata dal moto dei veicoli, atta a garantire nel tempo la transitabilità del traffico veicolare in condizioni di comfort e sicurezza. Essa deve ripartire sul terreno le azioni statiche e dinamiche dei mezzi di trasporto, fornire una superficie di rotolamento regolare e poco deformabile, proteggere il terreno sottostante dagli agenti atmosferici. Deve pertanto assolvere sia requisiti strutturali che funzionali. I requisiti strutturali comprendono la portanza (capacità di sopportare i carichi veicolari) e la durabilità (resistenza ai fenomeni di degrado) e sono principalmente funzione della tipologia di sovrastruttura (spessore e materiali). Quelli funzionali, direttamente dipendenti dall'interazione pneumatico-pavimentazione e strettamente connessi a comfort e sicurezza di guida, includono regolarità del piano viabile e aderenza pneumatico-piano di rotolamento. Con il passare degli anni il volume del traffico è sempre più elevato e questo porta ad avere delle strade sempre più sollecitate e quindi meno durevoli con il tempo. Per questo si ha sempre più l'esigenza di studiare materiali che hanno caratteristiche funzionali e prestazionali sempre più elevate con una crescente attenzione ai materiali utilizzati e al rispetto dell'ambiente.

L'obiettivo della seguente tesi è valutare le prestazioni di un conglomerato bituminoso contenente polverino di gomma riciclata (PFU) proveniente dai pneumatici fuori uso delle auto e dei camion, e confrontarle con i conglomerati di largo impiego come quelli tradizionali e quelli modificati hard. Questo tipo di conglomerato viene chiamato Asphalt Rubber è utilizzato già da molto tempo negli Stati Uniti e piano piano il suo utilizzo si sta affermando sempre di più anche in Europa perché viene utilizzato come valida alternativa per il confezionamento di conglomerati bituminosi di buona durabilità e resistenza sia alle condizioni di carico che agli agenti atmosferici. Oltre alle prestazioni che fornisce permette di recuperare tonnellate di pneumatici che andrebbero ad occupare spazio nelle discariche e a ridurre le emissioni che si produrrebbero per lo smaltimento.

La seguente tesi si sviluppa nei seguenti capitoli:

- **CAPITOLO 1: Stato dell'arte**
Vengono descritte la definizione e la funzione delle pavimentazioni stradali, i materiali utilizzati e le prove effettuate su di esse, l'asphalt rubber e gli impianti di produzione.
- **CAPITOLO 2: Programma sperimentale**
Vengono descritte le fasi operative svolte durante la sperimentazione e tutte le prove svolte: analisi volumetrica, pressa a taglio giratoria, e le prove ITSM, ITS, ITF.
- **CAPITOLO 3: Risultati**
Vengono messi in tabelle i risultati, confrontati tramite l'immissione dei dati all'interno di grafici e commentati
- **CONCLUSIONI**

CAPITOLO 1: Stato dell'arte

1.1 DEFINIZIONE E FUNZIONE DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

La pavimentazione stradale è la struttura piana sovrapposta al rilevato o al terreno in sito nelle trincee direttamente soggetta alle azioni dei veicoli, composta da una serie di strati sovrapposti di materiali differenti e di spessore più o meno grande. I principali fattori che ne determinano la struttura e la geometria sono: la natura, il tipo e l'intensità del traffico, non solo quello veicolare, ma anche le caratteristiche dell'ambiente e del contesto in cui si inserisce, nonché la morfologia e l'idrogeologia del territorio attraversato.

La funzione principale delle pavimentazioni stradali è quella di sopportare il peso degli automezzi e di trasmettere uniformemente i carichi al terreno sottostante e deve rispettare una serie di caratteristiche tali da garantire anche sicurezza per gli utenti, agevolare la mobilità dei mezzi e facilitare gli interventi di manutenzione. Infatti, la capacità di resistere alle sollecitazioni dei carichi e ambientali, determina la durabilità della pavimentazione. Quando la capacità di rispondere ad una di queste funzioni viene meno, sono necessari interventi di ripristino e manutenzione, correggendo eventuali eccessive deformazioni o fessurazioni dello strato di pavimentazione.

Le finalità delle pavimentazioni stradali possono essere racchiuse in quattro punti fondamentali:

- **Prestazioni strutturali**, ovvero la capacità di trasmissione dei carichi al sottofondo, e la capacità di resistenza al degrado strutturale dovuto ai carichi ciclici di passaggio e alle sollecitazioni ambientali;
- **Prestazioni funzionali**, ovvero quelle di garantire le migliori condizioni di interazione tra ruota e manto stradale, che avranno poi ripercussioni sull'aderenza nelle varie situazioni climatiche, che garantiscono le condizioni di comfort (poche buche) e sicurezza del moto;
- **Prestazioni nei confronti dell'acqua**, che tende a degradare la sovrastruttura aggredendo i materiali più in superficie e diminuendo la portanza dei materiali di fondo. La presenza dell'acqua è data sia da quella che penetra nella pavimentazione, sia da quella di risalita capillare, che in particolari condizioni climatiche tende a congelare e nella fase di disgelo a portare un forte stato di fessurazione e degrado della sovrastruttura;
- **Sostenibilità ambientale**, cioè la capacità di orientarsi verso l'eco-sostenibilità, mediante il risparmio di risorse non rinnovabili tramite l'utilizzo di rifiuti, riduzione dell'inquinamento acustico e mediante la realizzazione del corpo con tecniche atte ad un minore consumo di energia, preferibilmente con tecniche a freddo.

Siccome i carichi che agiscono sulle pavimentazioni possono essere molto elevati a causa del passaggio di mezzi pesanti tipo camion, autobus... , la formazione di un grosso strato di materiale non consentirebbe una buona compattazione e quindi un'adeguata portanza; Per questo si preferisce realizzare l'intera struttura in più strati in materiali diversi, via via più pregiati avvicinandoci alla superficie. Questi strati sono generalmente:

- **Strato di fondazione**: strato che ripartisce i carichi nel sottofondo. Molto spesso essa è a stretto contatto con l'acqua, per questo viene realizzato in misto granulare o con la stabilizzazione a calce delle terre. Nel caso il sottofondo è stato realizzato con elevata portanza può essere omesso.
- **Strato di base**: rappresenta la vera e propria struttura della struttura della strada ed ha sempre il compito di ripartizione, ma è per costruzione lo strato che risente maggiormente dei carichi di traffico. Esso viene realizzato in conglomerato bituminoso o misto cementato.
- **Strato di collegamento o binder**: è lo strato di collegamento tra la base e il manto d'usura, la sua funzione non è propriamente strutturale ma ha il compito di ancorare lo strato di usura allo strato di base senza l'accumulo di deformazioni permanenti e di garantire un piano di posa regolare.

- **Strato di usura:** strato più superficiale della pavimentazione e deve rispettare i requisiti di aderenza, impermeabilizzazione e resistenza la taglio.

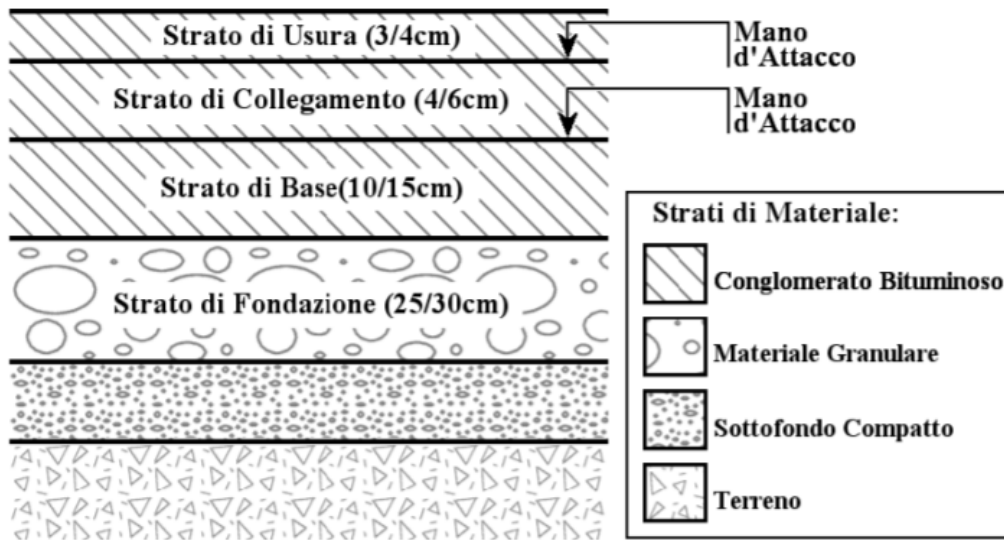


Figura 1: esempio di pavimentazione stradale

Esistono diverse tipologie di pavimentazioni stradali e in base alle loro caratteristiche le possiamo distinguere in: flessibili, semirigide e rigide;

Pavimentazione flessibile: Esse sono composte da un sistema di due o tre strati di conglomerato bituminoso, a seconda dell'importanza della strada, e da una fondazione in misto granulare, eventualmente stabilizzata con inerti di granulometria scelta o con leganti. La fondazione a sua volta si appoggia sul terreno naturale (sottofondo), eventualmente trattato, per un certo spessore.

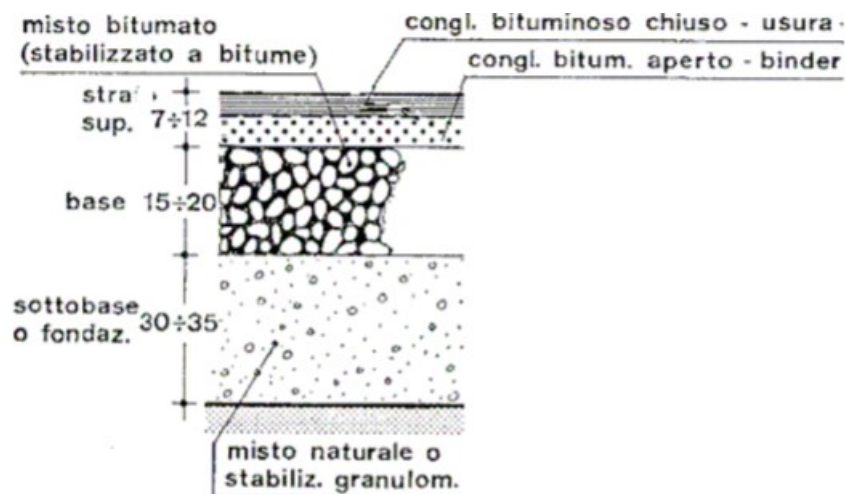


Figura 2: esempio di pavimentazione flessibile

Pavimentazione semirigida: Esse adottano il posizionamento di uno strato in misto cementato tra lo strato legato e quello in misto granulare che aumentano la rigidità rispetto al misto granulare

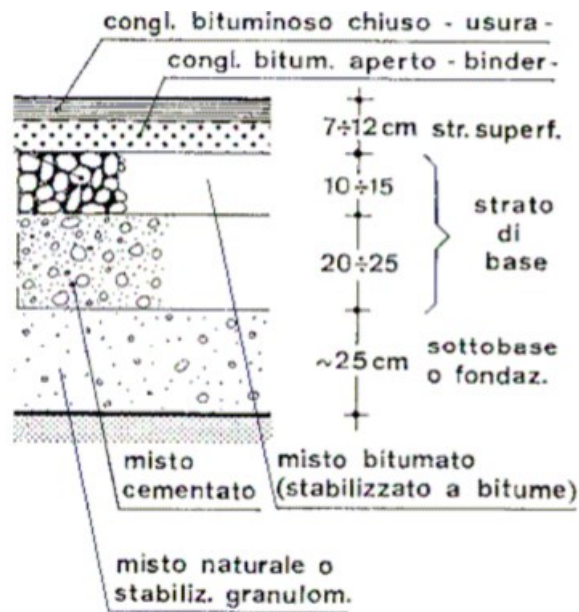


Figura 3: esempio di pavimentazione semirigida

Pavimentazione rigida: Esse sono formate da una o più lastre di conglomerato cementizio che hanno sia la funzione funzionale che strutturale. Possono essere poggiate direttamente sul sottofondo, ma molto spesso si preferisce inserire uno strato in misto granulare o cementato per creare un piano di posa omogeneo ben livellato.

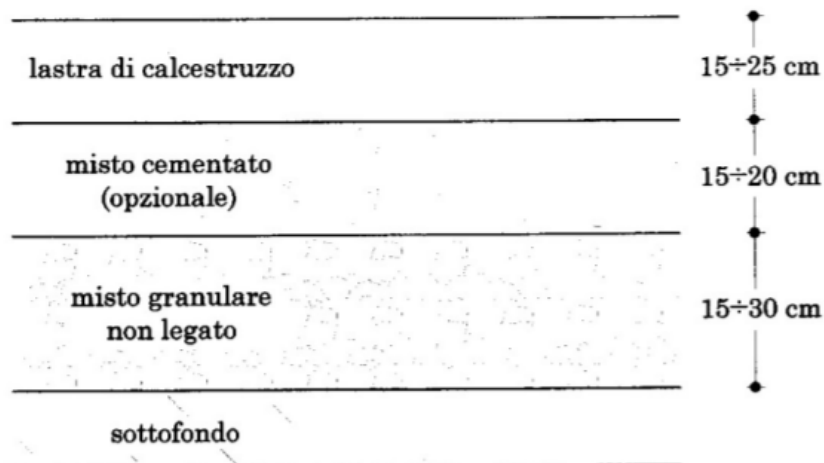


Figura 4: esempio di pavimentazione rigida

1.2 CONGLOMERATI BITUMINOSI

I conglomerati bituminosi sono delle miscele composte da materiali rocciosi di diversa granulometria (come filler, sabbia e pietrisco) con un legante di tipo bituminoso, che garantisce consistenza e coesione alla miscela conferendo al contempo un comportamento visco-elastico con risposta variabile in funzione dei modi e dei tempi di applicazione dei carichi, nonché della temperatura. Molte volte per migliorare le caratteristiche fisiche e chimiche dei materiali si prevede l'aggiunta di additivi (resine sintetiche, attivanti di adesione, polimeri), ottenendo così dei conglomerati ad alte prestazioni. La sua struttura consente di far aderire i pneumatici di auto e biciclette in maniera sicura anche in fase di frenata, in condizioni di pioggia e ghiaccio. Per questo esso trova largo impiego nelle pavimentazioni di strade e autostrade, aeroporti e in tutte le aree che necessitano di superfici percorribili da automezzi.

Nel caso delle pavimentazioni flessibili e semi-rigide, gli strati di base, binder e usura sono tutti realizzati in conglomerato bituminoso. Occorre tuttavia specificare che le caratteristiche del conglomerato non sono le stesse per ciascuno strato, ma variano a seconda della funzione che lo strato deve assolvere. La diffusione dei conglomerati per la costruzione delle pavimentazioni stradali è infatti anche legata alla grande varietà di miscele ottenibili operando sulla quantità e qualità dei materiali costituenti, varietà che permette di avere a disposizione prodotti rispondenti a esigenze diverse in termini di prestazioni funzionali e strutturali (tessitura, regolarità, impermeabilità, rumorosità, drenabilità). In particolare, le caratteristiche del conglomerato tendono a migliorare mano a mano che si risale verso la superficie (lo strato di usura sarà costituito da conglomerato più pregiato essendo a diretto contatto con lo pneumatico e dovendo garantire una serie di requisiti funzionali fondamentali per la sicurezza ed il comfort).

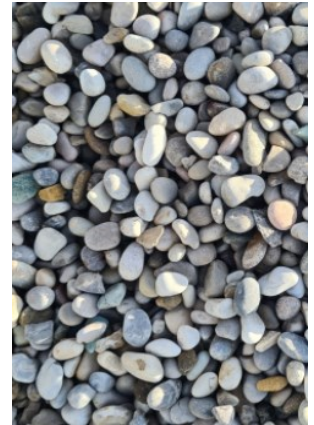
Gli aggregati devono essere opportunamente graduati in termini dimensionali, dalla dimensione massima fino al filler così da rientrare all'interno di un fuso granulometrico definito su una curva di distribuzione ottimale. Per la miscela lapidea infatti si fa riferimento alla formulazione di Fuller dove si adotta un diametro massimo per gli strati di base e diametri via via decrescenti per gli strati superficiali. Anche la quantità di bitume deve essere adeguatamente studiata in modo da ottenere caratteristiche volumetriche specifiche (percentuale di vuoti controllata) e adeguate prestazioni sotto carico. Il filler invece in una miscela può provenire parzialmente dalla frazione fina o essere totalmente di additivazione. La sua presenza è essenziale per la formazione del mastice (filler + bitume) che determina molteplici proprietà delle miscele. Nello specifico, una buona composizione del mastice permette di evitare il trasudamento, di prevenire lo spogliamento e di aumentare la stabilità delle miscele. Se dosato in quantità eccessive va a compromettere la lavorabilità e comporta un incremento della superficie specifica degli aggregati causando una riduzione dello spessore della pellicola di bitume che copre i granuli, esponendo il conglomerato a un processo di ossidazione più repentino. Per quanto riguarda gli additivi, sono costituiti da materiali naturali o artificiali che aggiunti nelle giuste quantità va a migliorare le prestazioni complessive del materiale.

Nel dettaglio, il conglomerato deve essere progettato in modo da garantire durabilità e funzionalità in esercizio. Ciò si traduce essenzialmente in miscele con elevata stabilità, vale a dire che a seguito del passaggio dei veicoli la miscela in conglomerato non deve subire deformazioni permanenti (depressioni, ormaie) e/o ammaloramenti di vario genere (fessurazioni, sgranamenti). Simultaneamente, il conglomerato deve anche rispondere efficacemente a fatica (resistenza alle sollecitazioni cicliche indotte dal passaggio dei veicoli).

1.3 AGGREGATI LAPIDEI

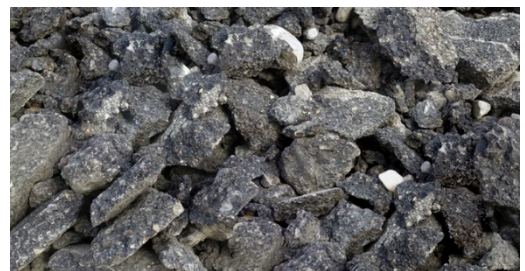
In tutti gli strati delle pavimentazioni, sia quelli superficiali in conglomerato bituminoso, sia in quelli profondi delle fondazioni non legate e stabilizzate con leganti, l'**aggregato lapideo** rappresenta, in volume la parte più importante: varia dal 60 % al 100 %. Le prestazioni richieste a tali materiali sono diverse a seconda del loro impiego negli strati inferiori o superiori delle sovrastrutture stradali. Una preliminare classificazione degli inerti è fatta distinguendo i materiali naturali, quelli artificiali e ancora quelli riciclati;

Aggregati lapidei naturali: Gli aggregati naturali sono quelli più diffusamente impiegati nelle opere stradali, provengono dalla frantumazione di rocce di grande dimensione o da frantumazione di materiali granulari di natura alluvionale presenti in natura. Tra queste i calcari, per la facilità di essere levigati, sono raramente impiegati negli strati superficiali, al contrario, essi sono ampiamente utilizzati negli strati inferiori, così come i materiali granulari alluvionali. Negli strati di usura trovano invece larga diffusione gli inerti provenienti dalle rocce eruttive e metamorfiche. In generale le rocce più utilizzate e più resistenti hanno una struttura fina e una porosità quasi nulla, con una microrugosità superficiale pronunciata e durevole.



Aggregati lapidei artificiali: Gli aggregati artificiali sono in genere ottenuti da sottoprodotti industriali e da scarti di lavorazione; offrono una rugosità non eccessiva, ma con una buona resistenza al mantenimento degli spigoli vivi.

Aggregati lapidei riciclati: Gli aggregati riciclati si ottengono dalla lavorazione di materiale inorganico, precedentemente utilizzati nelle costruzioni. In particolare grande attenzione viene rivolta ai materiali ottenuti dalla scarificazione di pavimentazioni esistenti (Reclaimed Asphalt Pavement RAP).



1.4 LEGANTI IDROCARBURICI ORGANICI

I leganti idrocarburici o leganti organici detti anche leganti neri, hanno una grandissima diffusione nelle costruzioni delle pavimentazioni flessibili. A seconda della loro origine, essi si suddividono in leganti organici classici e precisamente in bitumi, asfalti e catrami e leganti organici additivati di polimeri per migliorarne alcune caratteristiche.

I **bitumi** di cui si parlerà nel paragrafo successivo, sono miscele di idrocarburi e loro derivati non metallici, completamente solubili in solfuro di carbonio, ottenuti in maggiore quantità dalla distillazione frazionata del petrolio greggio. Esistono anche giacimenti naturali di bitume in alcune parti del mondo.

Gli **asfalti** sono generalmente prodotti dalla frantumazione o dalla distillazione di rocce asfaltiche naturali, cioè di rocce impregnate naturalmente di bitume.

Il **catrame** è un prodotto della distillazione secca dei carboni fossili che avviene nelle cokerie e nella produzione del gas illuminante di città.

I leganti organici hanno come caratteristica principale di possedere forte adesività e capacità legante, alle alte temperature si comportano quasi come un liquido (facilità di lavorazione, stesa, addensamento), alle basse temperature assumono la consistenza e le proprietà dei solidi elastici. La natura visco-elastica di questi leganti caratterizza il loro comportamento che dipende sia dalla temperatura sia dal tempo di applicazione dei carichi. Molto spesso il loro comportamento può essere definito come termo-reologico semplice o lineare, cioè vale il principio della sovrapposizione tempo-temperatura. Il comportamento ad una temperatura alta, con carichi applicati per un breve periodo di tempo, è equivalente al comportamento, ad una temperatura più bassa, con carichi applicati per periodi di tempo più lunghi. (Figura 5)

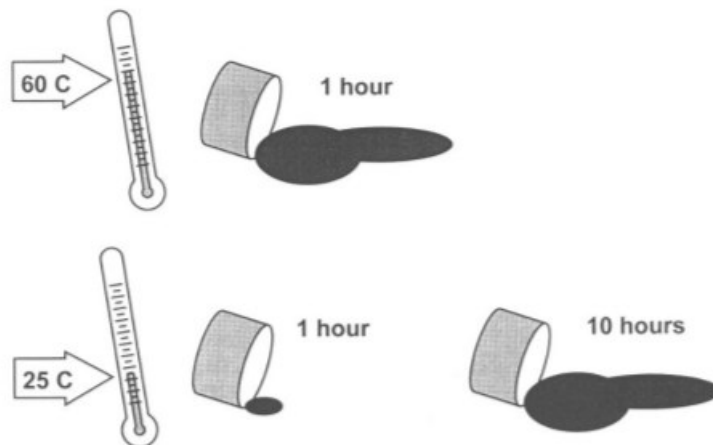


Figura 5: comportamento termo-reologico

Un altro aspetto dei leganti organici, da valutare attentamente, è l'invecchiamento. Tali leganti per la loro composizione chimica, reagiscono con l'ossigeno dell'aria. L'ossidazione determina dei cambiamenti strutturali che rendono il legante più fragile e meno deformabile. Questo processo avviene più rapidamente alle alte temperature.

1.5 BITUME TRADIZIONALE

Il bitume è un materiale conosciuto fin dai tempi più remoti ed è stato utilizzato dall'uomo, nel corso dell'evoluzione tecnologica, per risolvere i più svariati problemi sia nel campo delle costruzioni stradali, sia nell'altrettanto importante settore delle impermeabilizzazioni. Pur esistendo anche allo stato naturale, oggi viene soprattutto ottenuto dalla lavorazione del petrolio. Oltre ai bitumi derivanti da processi di raffinazione del greggio di petrolio, detti anche industriali o bitumi di petrolio, esistono dei bitumi, denominati naturali che, in forma più o meno pura e in diversi stati di consistenza, si presentano come ammassi sotterranei o a cielo aperto o come componenti impregnanti formazioni rocciose o sabbiose. Storicamente il bitume è stato il primo prodotto petrolifero utilizzato dall'uomo grazie al suo elevato potere adesivo ed impermeabilizzante. Nel tempo l'utilizzo dei bitumi naturali è stata abbandonata con lo sviluppo e l'affinamento delle tecniche di raffinazione, in grado di fornire bitumi in notevoli quantità a un prezzo via via più competitivo: essi sono tuttora utilizzati ma contribuiscono con una percentuale praticamente trascurabile alla produzione mondiale annua di bitume.

La ASTM International (American Society for Testing and Materials) definisce bitumi quella classe di materiali, composti prevalentemente da idrocarburi ad alto peso molecolare, solubili in disolfuro di carbonio. È un composto organico eterogeneo, generalmente ricavato dai processi di distillazione del greggio di petrolio. Essendo costituito dalle frazioni a più elevato punto di ebollizione di quest'ultimo, il bitume viene tradizionalmente ottenuto come prodotto di fondo della torre di distillazione sotto vuoto, preposta alla lavorazione del residuo di una prima distillazione a pressione atmosferica (Figura 6). Il materiale così ottenuto può essere direttamente impiegato, previa classificazione, per diverse applicazioni dell'ingegneria civile ed edile, che vanno dalla realizzazione di guaine di impermeabilizzazione alla produzione delle più svariate miscele per sovrastrutture stradali. Quando necessario, il residuo di distillazione viene inoltre sottoposto a processi di ossidazione, estrazione con solventi e/o miscelazione con altri bitumi che variano notevolmente a seconda dello schema di produzione di ciascuna raffineria e che hanno il comune scopo di modificarne opportunamente le caratteristiche chimiche e reologiche.

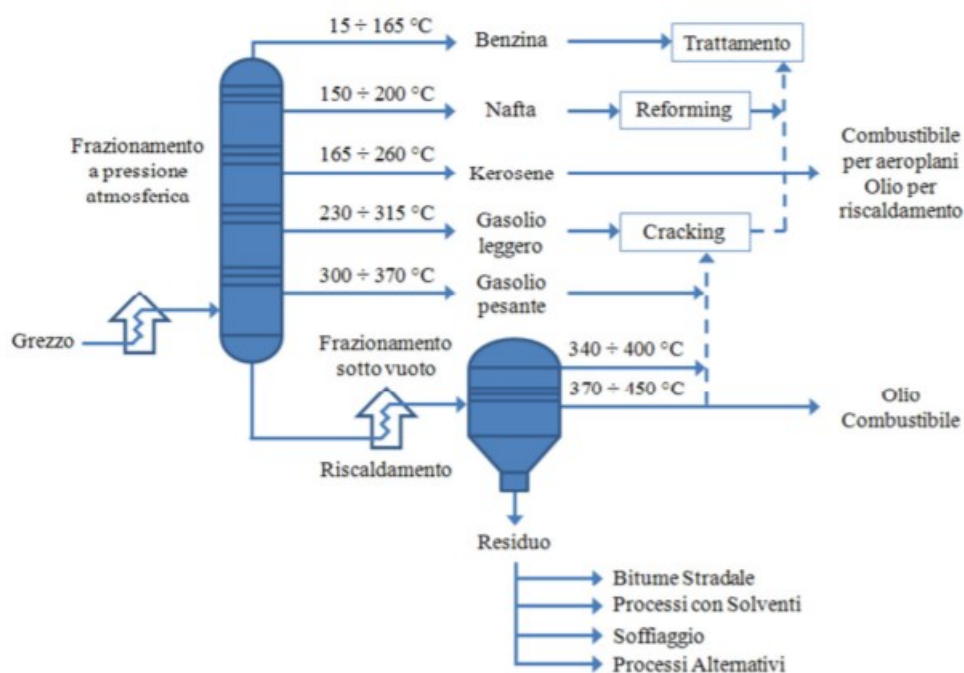


Figura 6: schema di frazionamento del petrolio greggio

PROCESSI PRODUTTIVI DEI BITUMI TRADIZIONALI

Oggi la quasi totalità dei bitumi presenti sul mercato provengono dalla lavorazione del petrolio grezzo nelle raffinerie, ma non tutti i grezzi sono adatti alla produzione del bitume. È lecito affermare che esistono grezzi particolarmente idonei per la loro resa in bitume, denominati **asfaltici**, alla cui categoria appartengono alcuni grezzi venezuelani e messicani. Esistono poi i grezzi **semi-asfaltici**, quali quelli provenienti principalmente dal Medio-Oriente, che danno rese accettabili in bitume. I grezzi libici ed alcuni nigeriani vengono invece definiti **non-asfaltici** e pertanto raramente impiegati per la produzione del bitume. I procedimenti trattati sono principalmente i seguenti:

- Distillazione frazionata
- Trattamento termico
- Produzione per sintesi o ricostruzione
- Ossidazione

Distillazione frazionata: è da considerarsi un processo primario. Il procedimento è concettualmente semplice: il grezzo viene riscaldato ad una temperatura di circa 400°C ed immesso nella colonna di frazionamento a pressione atmosferica, dove i suoi componenti a più basso punto di ebollizione cominciano ad evaporare salendo lungo la colonna. A questo punto i vapori entrano in contatto, in corrispondenza di speciali dispositivi posti lungo l'altezza della colonna, detti piatti di frazionamento, con una corrente fredda discendente detta riflusso. Lo scambio termico che ne consegue produce, su ogni piatto, la condensazione delle frazioni meno volatili dei vapori caldi e l'evaporazione di quelle più volatili del riflusso. È chiaro, quindi, che questo processo determina la presenza delle frazioni più volatili sui piatti posti più in alto nella colonna e, di conseguenza, il deposito delle frazioni meno volatili sui piatti a livello più basso. Le frazioni poste sul fondo della colonna prendono il nome di residuo atmosferico e possono essere impiegate per la preparazione degli oli combustibili oppure, nel caso di grezzi asfaltici, possono essere utilizzate come base per la produzione di bitume. La presenza di oli idrocarburici nel residuo atmosferico rende, però, necessario un successivo frazionamento all'interno di una seconda colonna, a pressione inferiore all'atmosferica e, quindi, in condizioni di sotto vuoto. L'estrazione delle frazioni più leggere viene agevolata dall'impiego di vapore acqueo introdotto dal fondo della colonna. Il bitume viene infine estratto dal fondo della colonna sottovuoto, tradizionalmente denominata colonna vacuum.

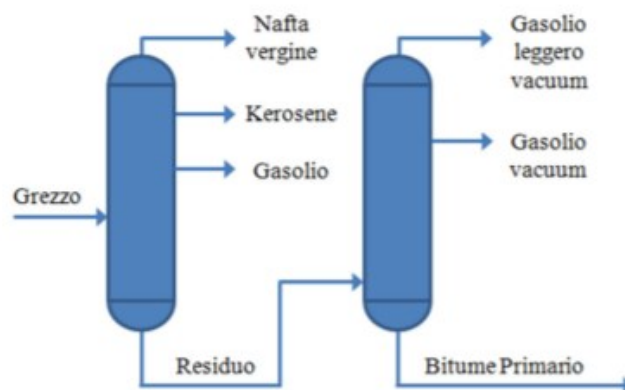


Figura 7: distillazione frazionata

Trattamento termico: si applica a quei processi di raffinazione del petrolio grezzo in cui l'obiettivo primario è ottenere una maggiore resa di prodotti leggeri. I processi termici sono di vario tipo ma l'elemento che li accomuna tutti è l'impiego di valori di temperatura e pressione molto elevati, tali da determinare, nei residui della distillazione, cambiamenti strutturali di tipo chimico, più o meno rilevanti a seconda del grado di severità scelto per la produzione, per convertire una parte della frazione pesante in distillati leggeri. È evidente che più il processo è severo più il residuo si presenta duro e, di conseguenza, il bitume che ne deriva ha le caratteristiche di un materiale più suscettibile alla temperatura, con un comportamento reologico che da visco-elastico tende al fragile. Uno dei processi termici più diffusi ancorché poco severo è il processo visbreaking (Figura 8), largamente utilizzato nell'ambito delle raffinerie italiane. L'impianto, costituito da un forno e da una colonna di frazionamento. Il bitume da visbreaking, specie se proveniente da processi poco severi, è usato comunemente per le applicazioni stradali e si è dimostrato particolarmente adatto per la produzione di membrane bituminose.

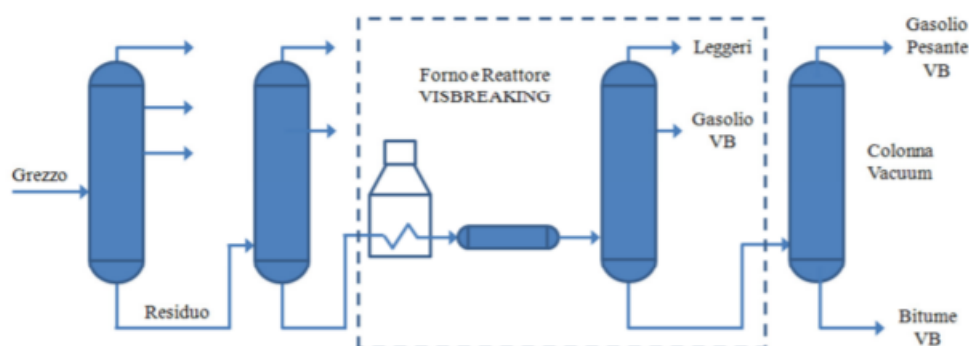


Figura 8: Produzione bitumi da visbreaking

Produzione per sintesi e ricostruzione: è un metodo che consiste nella miscelazione di componenti idrocarburici di natura asfaltica: asfalteni, resine ed oli. I componenti della sintesi si ottengono prevalentemente dai processi utilizzati per la deasfaltazione delle frazioni lubrificanti di greggi paraffinici, naftenici oppure misti, non particolarmente adatti a produrre bitume in senso tradizionale. Nella figura 9 è riportato lo schema di produzione del bitume da un impianto di deasfaltazione. Per la deasfaltazione viene utilizzato un solvente in grado di far precipitare, ovvero separare i composti asfaltici dalle altre frazioni idrocarburiche. Il solvente è generalmente propano liquefatto o più raramente una miscela di propano e butano liquefatti. Per questo motivo i composti asfaltici utilizzati per la sintesi prendono il nome di "asfalto al propano"; la loro consistenza spazia da valori di penetrazione molto bassi (1-5 dmm) fino a valori decisamente più alti (40-50 dmm). Dal punto di vista tecnico i bitumi sintetici presentano alcuni vantaggi: minore contenuto di paraffine e maggiore presenza di acidi organici che li rende più emulsionabili.

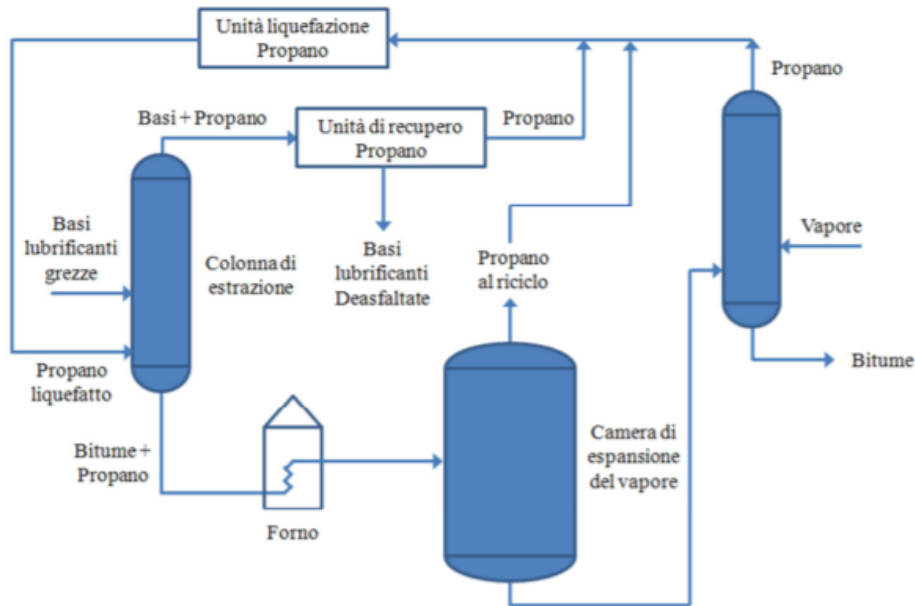


Figura 9: Produzione bitume da impianto di deasfaltazione basi lubrificanti.

Ossidazione: Uno dei metodi alternativi per produrre bitume è quello di ossidare i residui della distillazione primaria mediante la soffiatura con aria in condizioni controllate ad alta temperatura (230-280°C) e per un certo periodo di tempo. È bene precisare che l'ossidazione non ha nulla a che vedere con i tradizionali processi produttivi del bitume, in quanto è piuttosto da considerarsi come una conversione chimica degli idrocarburi. Infatti, per effetto dell'ossigeno si hanno le seguenti trasformazioni:

- alcuni idrocarburi, a struttura molecolare non complessa, appartenenti agli oli maltenici tendono ad acquistare la struttura macromolecolare delle resine;
- alcune resine tendono a trasformarsi in asfalteni leggeri;
- gli asfalteni leggeri si trasformano in asfalteni pesanti.

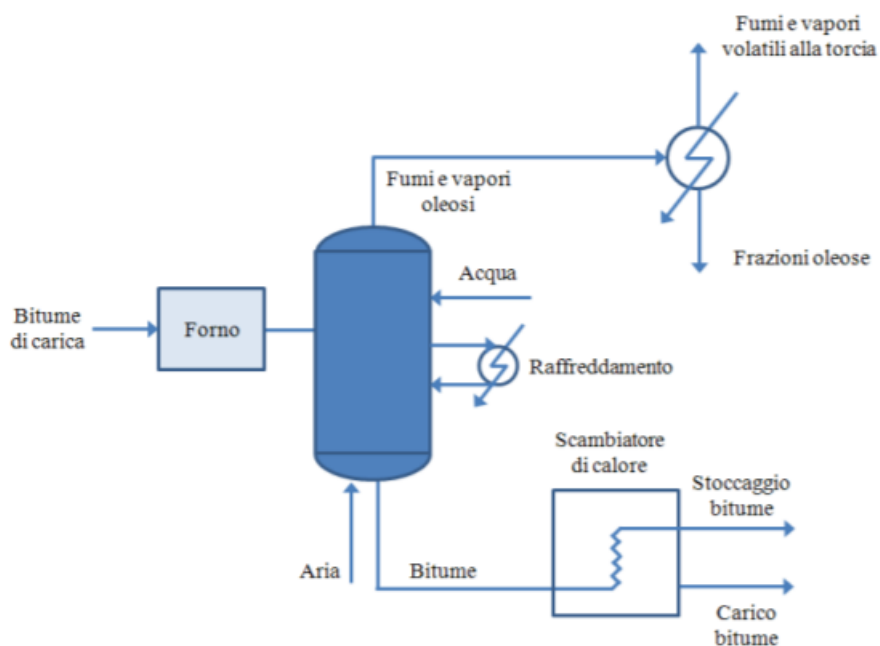


Figura 10: impianto di ossidazione

Il bitume è un materiale viscoelastico quindi se è sottoposto a brevi tempi di carico si ha una deformazione di tipo elastico, al contrario se è soggetto a lunghi tempi di carico si comporta come una sostanza viscosa dando origine a deformazioni irreversibili. È un materiale termoplastico per cui si presenta in uno stato solido-fragile alle basse temperature, in uno stato solido-semisolido alla temperatura ambiente, e allo stato liquido alle alte temperature. Ciò deriva dalla sua struttura macromolecolare, nella quale una molteplicità di famiglie di molecole caratterizzate da funzionalità e polarità differenti danno luogo a interazioni di intensità variabile. Per questo siccome il bitume è un materiale termo-dipendente e viscoelastico, bisogna prestare una particolare attenzione alla scelta del legante più idoneo a seconda delle condizioni di carico e ambientali cui la pavimentazione sarà soggetta nell'arco della propria vita utile.

Le proprietà meccaniche e fisiche del bitume sono strettamente legate alla sua composizione chimica, fisica e strutturale. Dal punto di vista chimico-fisico il bitume è una sostanza formata da molti composti chimici differenti, (circa 500-700 composti) aventi pesi molecolari variabili. I rapporti quantitativi tra le diverse componenti vengono determinate con metodi di frazionamento non molto complessi, che permettono di suddividere la composizione in pochi gruppi di molecole aventi le stesse caratteristiche e proprietà. Uno dei metodi più utilizzati è il Metodo di Richardson che divide il bitume nelle seguenti classi:

- Carboidi: elementi insolubili in solfuro di carbonio (CS_2)
- Carbeni: elementi insolubili in tetracloruro di carbonio (CCl_4)
- Asfalteni: elementi insolubili in alcano basso bollenti
- Malteni: elementi insolubili negli alcani basso bollenti, i quali vengono divisi in resine e oli

I carboidi e i carbeni sono presenti in quantità modeste, infatti si dice che normalmente i carboidi devono essere presenti all'1%. Quindi visto la quantità irrilevante di carboidi e carbene possiamo affermare che il bitume ha come costituenti principali: asfalteni, resine e oli.

Asfalteni: sono solidi amorfi costituiti da miscele complesse di idrocarburi, hanno una struttura aromatica, cioè ciclica non satura, sono di colore nero o marrone ed insolubili in n-eptano. La caratteristica che li contraddistingue è l'elevata polarità, la quale traduce la presenza di molecole in cui i legami polari individuali non sono collocati in modo perfettamente simmetrico e dunque non in equilibrio. Gli Asfalteni hanno un grande effetto sulle caratteristiche del bitume anche se sono presenti nel bitume solo tra il 5% ed il 25% in peso. L'aumento del contenuto di Asfalteni determina un bitume più duro e più viscoso, con un valore di penetrazione più basso ed un punto di rammollimento più alto.

Resine: sono composti solubili strutturalmente molto simili agli Asfalteni, di colore marrone scuro e consistenza solida o semisolida, circa uguale alla consistenza dell'intero bitume. Le resine sono di natura polare ed hanno notevoli proprietà adesive, svolgono la funzione di agenti disperdenti o peptizzanti per le strutture macromolecolari asfaltiche. Sono dei co-solventi per Oli ed Asfalteni, mutuamente insolubili se non sono presenti in concentrazioni adeguate. Quando il bitume si ossida le Resine acquisiscono molecole di ossigeno ed assumono una struttura simile agli Asfalteni, quindi la proporzione tra resine ed Asfalteni governa, in larga misura, il carattere del bitume. Costituiscono dal 10% al 25% in peso del bitume.

Oli: si suddividono in due classi: oli aromatici e oli saturi, in relazione al tipo di legami chimici prevalenti nella struttura. Gli oli aromatici sono rappresentabili come un liquido viscoso, di colore marrone scuro, contenente numerosi composti a basso peso molecolare con anelli aromatici. Essi sono costituiti da catene di C non polari in cui dominano i sistemi di anelli insaturi (aromatici) ed hanno un alto potere solvente nei confronti degli altri idrocarburi ad elevato peso molecolare. Gli aromatici costituiscono la frazione maggiore del bitume, dal 40% al 60% in peso, e rappresentano la gran parte del mezzo di dispersione degli Asfalteni peptizzati. Gli oli saturi invece sono un liquido viscoso, di

colore bianco giallastro, costituito essenzialmente da idrocarburi saturi a lunga catena, alcuni dei quali con ramificazioni, e da nafteni. Essi sono composti di tipo non polare, di peso molecolare simile a quello degli aromatici, e corrispondono ad una percentuale tra il 5% ed il 20% in peso del bitume. I saturi contengono la maggior parte delle cere presenti nei bitumi, le quali si presentano in forma paraffinica. Gli oli saturi e gli aromatici possono essere considerati gli agenti elasticizzanti del bitume.

Il comportamento reologico di un bitume si modifica al variare della temperatura, in particolare possiamo affermare che: per ogni bitume esiste una temperatura (T^*) tale che per una temperatura maggiore di T^* il comportamento reologico possa essere associato a quello di un materiale incapace di resistere staticamente a forze di taglio. Oppure esiste una temperatura (T_g) detta temperatura di transizione vetrosa tale che per temperature minori di T_g il comportamento reologico possa essere associato a quello di un solido.

Nel tempo il bitume tende a subire un invecchiamento e va a determinare la vita utile del conglomerato bituminoso. Il processo di invecchiamento dipende principalmente da due fattori predominanti: dal greggio da cui ha origine e dal processo di produzione del conglomerato bituminoso. A prescindere dal processo con il quale viene prodotto, l'invecchiamento può essere suddiviso in due tipi differenti:

- **Invecchiamento primario o a breve termine** avviene a temperature variabili in base al tipo di bitume e si genera durante la fase di miscelazione del legante con gli inerti ed il processo di stesa e compattazione. (determinato dall'esposizione prolungata alle alte temperature di miscelazione)
- **Invecchiamento secondario o di lungo termine** avviene durante l'esercizio della pavimentazione e ha una durata di decenni in quanto si sviluppa durante tutta la vita utile della strada (determinato dall'esposizione del materiale agli agenti atmosferici)

In entrambi i casi, il bitume subisce fenomeni di ossidazione che comportano la perdita delle componenti volatili più leggere (malteni). Conseguentemente, il legante risulta progressivamente più ricco di asfalteni (la componente più dura e consistente) e tende quindi a diventare più rigido, ma anche potenzialmente più fragile e maggiormente esposto al fenomeno della fessurazione.

PROVE EFFETTUATE SUI LEGANTI BITUMINOSI

Per classificare e controllare tutti i tipi di bitumi si possono eseguire le seguenti prove:

1. **Prova di penetrazione:** permette di determinare la consistenza del bitume tramite la misura della penetrazione in dmm di un ago normalizzato in un campione di bitume condizionato a 25°. Per garantire che il provino è condizionato in modo omogeneo alla temperatura di 25°, si mette il bitume all'interno di una stufa a 25° per un'ora. Dopo di che si effettua la prova infliggendo sul provino un ago con un carico di 100 gr per un tempo di 5 secondi e si ripete la prova per 3 volte e si fa una media dei risultati ottenuti. Questa prova permette di fare una classificazione sul grado di durezza come intervallo di valori. Per esempio un bitume che ha una penetrazione compresa tra 70 e 100 decimillimetro viene denominato con la sigla 70/100.



Figura 11: prova di penetrazione

2. **Palla-anello:** permette di determinare il punto di rammollimento in gradi (°C) del bitume in un intervallo di temperatura contenuto tra 30 e 150°C. Fornisce una stima del punto di passaggio da uno stato visco-elastico a uno puramente viscoso. Il bitume caldo viene versato in uno speciale anello di ottone e caricato al centro con una sfera di acciaio di dimensioni e peso standardizzati. Il provino così predisposto viene inserito in un bagno soggetto a riscaldamento. La temperatura del bagno viene incrementata con un gradiente costante fintanto che il bitume, che sotto il peso della sfera tende a deformarsi, non tocca la base del sistema di prova posta a 2,54 cm sotto il piano di partenza. La temperatura del bagno a cui si verifica questa condizione corrisponde al punto di rammollimento (temperatura alla quale il bitume passa dallo stato semisolido allo stato semi-liquido). Tale valore restituisce un'idea del comportamento del materiale alle alte temperature di esercizio.

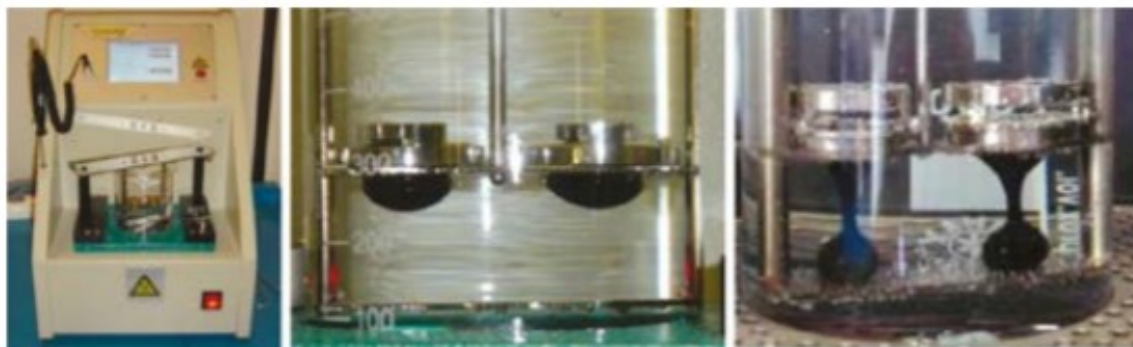


Figura 12: prova palla-anello

3. **Prova fraass:** permette di misurare la fragilità di un bitume a bassa temperatura tramite la determinazione del punto di rottura del bitume per flessione con metodo standardizzato. Il bitume a temperature basse tende ad avere un comportamento fragile, infatti questa prova permette di determinare la temperatura alla quale abbiamo una rottura fragile chiamato punto di rottura Fraass. La prova prevede di misurare la temperatura alla quale un film di bitume (spessore pari a 0,5 mm) applicato su una piastrina rettangolare metallica ($41 \times 20 \times 0,15$ mm) presenta sulla sua superficie le prime screpolature per effetto di flessioni cicliche applicate con frequenza ed ampiezza costanti (1 giro/sec) man, mano che la temperatura decresce con gradiente costante ($-1^\circ\text{C}/\text{min}$) partendo da una temperatura iniziale di 15°C superiore rispetto al valore Fraass atteso. Si ricava così una valutazione del comportamento del materiale alle basse temperature di esercizio.



Figura 13: prova Fraass

4. **Prova di viscosità dinamica:** permette di determinare la viscosità di un bitume ad una specifica temperatura attraverso un roto-viscosimetro a cilindri coassiali. Il bitume viene riscaldato e colato in un cilindro posto all'interno di un forno elettrico che condiziona il provino alla temperatura di prova desiderata (compresa tra 100°C e 165°C). Una girante con punta conica viene quindi immersa nel provino e fatta girare a velocità costante (20 giri/min). Si misura la resistenza che il provino oppone a tale rotazione, direttamente correlabile alla viscosità. L'andamento della viscosità con la temperatura fornisce un riferimento per valutare la lavorabilità della miscela alle temperature di miscelazione e compattazione. Inoltre, permette di valutare in maniera molto efficace l'eventuale presenza di polimero nei bitumi modificati



Figura 14: prova di viscosità dinamica

5. **Prova di duttilità:** permette di misurare le caratteristiche a trazione di un bitume attraverso l'allungamento di campioni standard in un bagno termostatico. La prova consiste nel determinare le proprietà di elasticità di un bitume ad una specifica temperatura. Un campione di bitume di forma e dimensioni standardizzate è sottoposto, in un bagno termostatico alla temperatura di 25°C, ad una elongazione di 50 mm/min fino ad una elongazione massima di 200 mm, dopodiché si taglia il campione in due ottenendo due lembi. Il ritorno elastico è valutato misurando dopo 30 minuti dal taglio del campione la distanza d (espressa in mm) tra le estremità dei due lembi del provino. Come la prova di viscosità, tale metodologia permette di verificare in maniera efficace la presenza di polimero nei bitumi modificati che presentano un valore di ritorno elastico nettamente superiore a quello manifestato da un bitume tradizionale.



Figura 15: prova di duttilità

6. **Rolling thin film oven test:** permette di prevedere il cambiamento della reologia del bitume effettuando dei trattamenti termici di qualsiasi tipologia. Lo scopo è quello di prevedere l'invecchiamento del bitume a breve termine causato dall'ossidazione del bitume e dalla perdita di materiali volatili. La prova viene effettuata con un macchinario che riscalda il bitume in una stufa rotante a 163°C per 75 minuti, durante la quale viene misurata la quantità di sostanze volatili che lasciano il bitume. Poi si confrontano i dati della prova prima e dopo il riscaldamento per vedere gli effetti subiti. Generalmente si riscontrano aumenti della durezza del bitume e aumento del punto di rammollimento del bitume con una conseguenza della diminuzione della penetrazione.



Figura 16: Rolling thin film oven test

1.6 BITUME MODIFICATO

Idealmente, il legante ottimale per il confezionamento di conglomerati bituminosi dovrebbe garantire una consistenza costante e sufficientemente elevata in tutto il range delle temperature di esercizio cui la pavimentazione può essere sottoposta durante l'arco della propria vita utile (Figura 17). La consistenza dello stesso dovrebbe velocemente ridursi nel range delle temperature di lavorazione al fine di evitare un riscaldamento eccessivo del materiale per poterlo rendere lavorabile (limitando così i consumi energetici e le emissioni in atmosfera legate ai processi produttivi e migliorando al contempo le condizioni lavorative degli operatori in impianto e in cantiere).

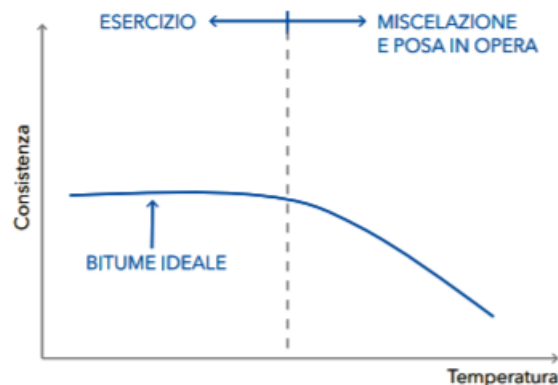


Figura 17: Comportamento di un bitume ideale al variare della temperatura

Tradizionalmente, nei conglomerati bituminosi per uso stradale è stato impiegato per decenni bitume tal quale del tipo 50/70 o 70/100. Se si analizza il comportamento di un bitume del genere al variare della temperatura a cui è sottoposto, si ricava un andamento pressoché lineare, quindi notevolmente differente rispetto a quello ideale (Figura 18).

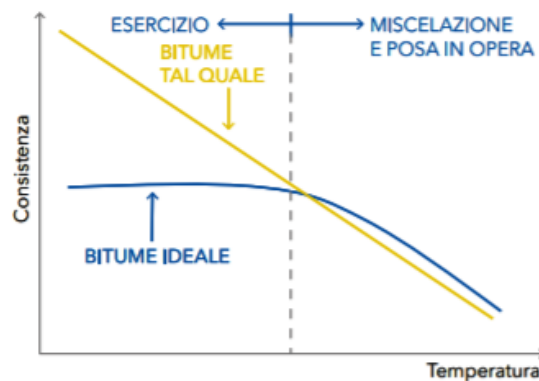


Figura 18: Comportamento di un bitume tal quale

Occorre inoltre considerare che le modifiche apportate negli ultimi decenni ai processi di distillazione del petrolio (per aumentare l'estrazione dei prodotti maggiormente pregiati e remunerativi) hanno provocato ripercussioni negative in termini di qualità del bitume tal quale che ne scaturisce, con particolare riferimento a una maggiore tendenza all'indurimento durante la miscelazione e la stesa del conglomerato bituminoso. Conseguentemente, le miscele in conglomerato che impiegano bitume tal quale sono potenzialmente più soggette a fenomeni di sgranamento e fessurazione. Per ovviare a tali problematiche e, in generale, per migliorare le prestazioni del conglomerato in esercizio avvicinandosi al comportamento ideale sopra descritto, è possibile ricorrere all'impiego di **bitumi**

modificati con aggiunta di polimeri. Modificare un bitume tramite l'aggiunta di componenti "esterne" (come: polimeri termoplastici di tipo plastomerico o elastomerico) comporta variazioni delle caratteristiche fisiche, chimiche e reologiche del materiale. A parità di penetrazione, si può affermare che i bitumi modificati garantiscono, rispetto ad un bitume tradizionale, un intervallo di elastoplasticità mediamente più elevato (Figura 19).

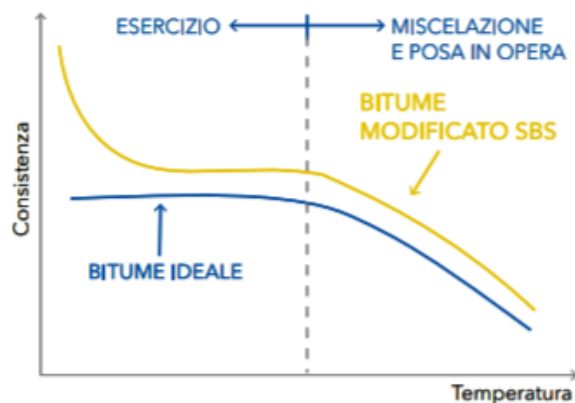


Figura 19: Comportamento di un bitume modificato

Ciò si traduce nel mantenimento di un comportamento elastico del materiale in un range più ampio di temperature di esercizio (estensione del comportamento ottimale di almeno 15-20°C sia alla alte che alle basse temperature). Ciò determina una minore sensibilità alle escursioni termiche e maggiore reversibilità alle deformazioni sotto l'azione del traffico, limitando la formazione di deformazioni plastiche (ormae). Il polimero permette quindi al bitume di garantire maggiore resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti anche laddove la pavimentazione sia esposta a temperature di esercizio mediamente elevate in corrispondenza di notevoli flussi di traffico veicolare pesante, così come un miglior comportamento in climi freddi, riducendo la fragilità alle basse temperature. La presenza del polimero consente, inoltre, un miglior assorbimento delle sollecitazioni cicliche indotte dal traffico veicolare (maggiore resistenza a fatica). Al contempo riduce la tendenza del materiale all'invecchiamento, conferendo pertanto maggiore durabilità all'intera miscela, e migliora l'adesione tra componente legante e lapidea (allontanando il pericolo di fenomeni di spogliamento e sgranamento). In tal senso, l'impiego di bitumi modificati è raccomandato in tutte le situazioni ove siano richieste particolari caratteristiche di resistenza meccanica e adesione (come: miscele di conglomerato bituminoso drenanti o trattamenti superficiali sottoposti ad elevato traffico pesante, che non garantiscono con un legante convenzionale il raggiungimento di adeguati livelli di resistenza meccanica a causa della carenza di adesione e coesione per effetto dell'azione degli agenti atmosferici e della discontinuità dei punti di contatto all'interno dello scheletro litico). Per ottenere una buona lavorabilità durante le fasi di miscelazione e compattazione, occorre sottolineare che si deve riscaldare la miscela a temperature più elevate rispetto a quanto necessario per miscele confezionate con bitume non modificato (mediamente superiori di almeno 15-20°C). In commercio è possibile reperire diversi tipi di bitume modificato a seconda della natura chimica e della quantità di polimero impiegato. In particolare, si distinguono due possibili tipologie di bitume modificato: si parla di bitume **"soft"** quando si considerano tenori di polimero limitati (le caratteristiche meccaniche e reologiche del bitume variano entro un intervallo ristretto), mentre la modifica si definisce **"hard"** quando il tenore di polimero è tale da influenzare in maniera significativa il comportamento reologico del bitume stesso (rendendolo assimilabile a quello del polimero aggiunto). Sul bitume modificato, oltre alle prove standard per la caratterizzazione dei bitumi sopra introdotte, vanno eseguite anche le prove di controllo per accertare l'entità della modifica (quantità di polimero aggiunto) e la tendenza all'invecchiamento. Inoltre, aspetti fondamentali per la buona resa del materiale riguardano la dispersione omogenea del polimero all'interno del bitume base e la stabilità del prodotto finale (il

polimero non deve tendere a segregarsi dalla matrice bituminosa in cui è disperso). Per quanto riguarda la scelta del bitume da adottare, considerando la ridotta differenza di costo attualmente esistente tra bitumi tal quali (TQ) e bitumi modificati, siano essi hard o soft, le prestazioni nettamente superiori che questi ultimi sono in grado di garantire, è sempre raccomandabile l'impiego di bitume modificato in tutti gli interventi di nuove opere e risanamento profondo. L'impiego di bitumi tal quali dovrebbe essere limitato ai casi di risanamento superficiale su strade a basso traffico in zone con clima non particolarmente rigido, dove si deve andare a ripristinare l'esistente su una pavimentazione in conglomerato bituminoso confezionato con bitume tal quale (in modo tale da non generare variazioni di rigidità e differenze prestazionali eccessive tra il nuovo strato e gli esistenti). Nel caso di impiego di bitumi modificati, la scelta del tenore di modifica è anch'essa principalmente funzione dell'entità del traffico e delle condizioni climatiche che la pavimentazione in esame si troverà ad affrontare durante l'arco della propria vita utile (bitumi hard sono da preferire per tutte le pavimentazioni sottoposte a condizioni più gravose). Un ulteriore fattore discriminante in tal senso è rappresentato dal quantitativo di materiale fresato eventualmente incluso nelle miscele di conglomerato confezionate a caldo. Oltre una certa soglia di fresato, variabile a seconda dello strato considerato, è sempre raccomandabile impiegare bitume modificato. Oltre tale valore limite, la scelta del tenore di modifica deve essere operata considerando la rigidità complessiva della miscela finale. Infatti, durante la miscelazione il bitume che riveste i granuli di fresato, venendo a contatto con gli aggregati naturali e il bitume vergine di aggiunta entrambi riscaldati ad elevata temperatura, tende almeno parzialmente a "riattivarsi" miscelandosi con gli altri materiali componenti. Il bitume così riattivato è caratterizzato da una rigidità notevolmente superiore rispetto a quella posseduta inizialmente a causa dei processi di invecchiamento subiti a breve e lungo termine. Affinché la miscela di conglomerato risultante non risenta eccessivamente della presenza di questo materiale irrigidendosi a sua volta e palesando un'eccessiva fragilità, occorre adottare accorgimenti che permettano di compensare l'incremento di rigidità conferito dal materiale riciclato. A tal fine si può agire selezionando un bitume vergine di aggiunta più "soffice" in modo da bilanciare la rigidità del bitume invecchiato proveniente da fresato. Proprio per tale ragione, le norme prescrivono l'impiego di bitume "soft" piuttosto che "hard" laddove si considerino percentuali di fresato elevate.

La scelta del polimero dipende dalla natura chimica del bitume proveniente da un qualsiasi greggio, per questo tramite moderne tecniche analitiche è possibile scegliere il polimero che mostrerà maggiore affinità, compatibilità e maggiore omogeneità alla miscela nel tempo. Conoscere la natura delle componenti bitumi e polimero permette anche di scegliere il tipo di impianto e le condizioni adeguate per garantire la miscelazione nella forma più esatta possibile nel più breve tempo possibile e con il minimo dispendio di energie.

I polimeri sono composti chimici complessi le cui molecole derivano dall'unione di più molecole semplici, dette monomeri, a catena lunga o reticolare. Se questi ultimi sono presenti nelle molecole in due o più tipi diversi, il polimero è detto copolimero. Al contrario, molecole composte di monomeri uguali tra loro prendono il nome di omopolimero. I polimeri solitamente esibiscono forti legami covalenti lungo le catene polimeriche, ma legami secondari più deboli con le catene adiacenti. Molti polimeri sono semplici composti di idrogeno e carbonio; altri contengono ossigeno (acrilici), azoto (nylon), fluoro (fluoroplastiche) e silicio (siliconi).

I diversi tipi di polimeri sul mercato possono essere ricondotte a due grandi famiglie:

- Termoidurenti
- Termoplastici

Polimeri termoindurenti: hanno strutture reticolari che si formano per riscaldamento con un aumento della rigidità. Diventano duri e rigidi quando vengono riscaldati: questo fenomeno non svanisce con il raffreddamento perché è una caratteristica strutturale che si formano mediante il meccanismo della polimerizzazione a stadi, essi vengono formati mediante stampaggio a compressione o stampaggio a trasferimento. (non vengono utilizzati perché troppo rigidi in fase di esercizio dopo il raffreddamento)

Polimeri termoplastici: se riscaldati diventano più cedevoli a causa dell'agitazione termica dei legami deboli tra le molecole lineari adiacenti. Essi includono polimeri ingegneristici e gli elastomeri termoplastici, materiali simili alla gomma che possono essere riciclati e prodotti con le tecniche tradizionali. La plasticità a temperature elevate è dovuta alla capacità delle molecole di scorrere una sull'altra. Questi tipi di polimeri vengono prodotti mediante stampaggio a iniezione, stampaggio per estrusione o stampaggio mediante soffiatura. (molto utilizzati perché hanno caratteristiche termiche simili ai bitumi).

Quindi riassumendo possiamo affermare che i polimeri adottati per la modifica del bitume possono quelli termoplastici e possono essere classificati in tre grandi categorie:

- **Elastomeri termoplastici:** costituiscono circa il 75% dei polimeri presenti sul mercato; i più diffusi sono SBS (Stirene-Butadiene-Stirene), SIS (Stirene-Isoprene-Stirene) e SBR (Stirene-Butadiene-Rubber)
- **Plastomeri termoplastici:** rappresentano il 15% dei polimeri presenti sul mercato; i più diffusi sono HDPE (Polietilene ad alta densità), EVA (Etilene vinilacetato) e EMA (Etilene metacrilato)
- Materiali di varia natura come resine termoindurenti, granuli di gomma vulcanizzata, ma poco utilizzati.

E' opportuno analizzare in dettaglio alcuni dei principali modificanti:

SBS: è un copolimero a blocchi, il suo scheletro è costituito da tre segmenti: il primo è una lunga catena di polistirene, la parte centrale è polibutadiene e l'ultimo tratto è un'altra lunga frazione di polistirene. Il polistirene è una plastica tenace e resistente, e conferisce al polimero SBS la sua durabilità, mentre il polibutadiene è un materiale gommoso. L'SBS ha quindi una struttura bifasica costituita da micro domini ricchi di blocchi polistirenici interconnessi mediante segmenti polibutadienici. A temperature ordinarie i domini polistirenici si trovano sotto la loro temperatura di transizione vetrosa (circa 100 °C), mentre la fase disperdente butadienica è nello stato flessibile ed è quella che consente al materiale di deformarsi in maniera significativa. Quando l'SBS viene a contatto ad alta temperatura con il bitume, quest'ultimo "rigonfia" il polimero e diffonde al suo interno. È considerato il polimero più appropriato per la realizzazione del bitume modificato, nonostante i limiti economici, tecnici e meccanici, tra cui la scarsa capacità di movimento. Presenta una bassa duttilità alle differenti temperature.

SBR: è stato ampiamente impiegato quale modificante per leganti a causa della duttilità a bassa temperatura che consente alla pavimentazione di essere flessibile e maggiormente resistente a rottura a basse temperature. Le ottimali proprietà dielettriche, l'aumento di viscosità, il recupero elastico, le proprietà di aderenza e coesione delle pavimentazioni sono alcuni tra i principali benefici di questo polimero. Nella fase di miscelazione, le macromolecole si disperdono rapidamente e uniformemente nella matrice del materiale, formando una struttura a rete di rinforzo. Nonostante il largo impiego, il copolimero SBS ha sostituito SBR in quanto conferisce maggiore resistenza allo sforzo e presenta una migliore adattabilità alle differenti tipologie di leganti. I bitumi modificati con SBR garantiscono un'alta duttilità a tutte le temperature, mentre quelli con SBS tendono ad avere una bassa duttilità.

IL CRUMB RUBBER MODIFIER: ovvero l'utilizzo come modificante di gomma polverizzata, e il connubio asphalt-rubber, quale combinazione di gomma riciclata e asfalto da pavimentazione. Le caratteristiche di questo rivoluzionario sistema dipendono dal tipo di gomma, dalla composizione del bitume, dalla dimensione dei polverini di gomma, dal tempo e dalla temperatura di reazione. Comunemente la gomma viene riciclata dagli inutilizzati pneumatici automobilistici, con il doppio vantaggio di recuperare spazio nelle discariche, altrimenti sommerse da tali rifiuti, e ridurre i costi. Il bitume modificato con gomma naturale presenta una migliore resistenza al rutting ed elevata duttilità, ma l'agente risulta sensibile alla decomposizione e all'assimilazione di ossigeno. A causa dell'elevato peso molecolare, presentano problemi di bassa compatibilità. La gomma riciclata dai pneumatici riduce i fenomeni di cracking e di rutting, che limitano la durabilità del legante a lungo termine ma necessita di elevate temperature di miscelazione e di lunghi intervalli di tempo per realizzare la dispersione nel bitume, al fine di evitare la separazione del composto.

Per determinare la dispersione del polimero nel bitume modificato si può usare un microscopio a fluorescenza che sfrutta la caratteristica dei polimeri di rimettere luce nel campo del visibile se sottoposti a luce ultravioletta e del bitume di presentarsi nero o bruno scuro. Per una buona riuscita della prova è molto importante la preparazione del campione da trattare. L'apparecchiatura necessaria per determinare la dispersione è composta da: un microscopio a fluorescenza (eccitazione a luce incidente), con un'appropriata sorgente di luce e dei sistemi di filtri; un freezer o del diossido di carbonio solido; uno strumento tagliente; un contenitore in alluminio, monouso, approssimativamente di altezza pari a 35 mm e di diametro pari a 70 mm; un evaporatore in porcellana, con diametro di 150 mm e altezza di 63 mm (volume approssimato: 600 ml); dell'aggregato fine (sabbia); un bagno di sabbia a temperatura regolata. Si deve analizzare ogni campione di bitume modificato, sfruttando un minimo di 3 superfici, preparate separatamente, valutando l'intera area prima di raccogliere la caratteristica immagine. Quest'ultima può essere ottenuta e memorizzata con sistemi fotografici o elettronici. Se non sono percepite emissioni fluorescenti e il campione appare tutto nero, si indica lo stato con "O". Se il polimero è più o meno disperso nella matrice bituminosa il livello di distribuzione della fase polimerica ha un'importante influenza sulle proprietà fisiche del sistema legante. Infine se la frazione polimerica diviene la fase continua in cui il bitume è più o meno distintamente disperso la frazione polimerica è importante per le proprietà fisiche del sistema.

Polimero	Vantaggi	Svantaggi	Impieghi
Stirene-Butadiene-Stirene (SBS) Stirene-Isoprene-Stirene (SIS)	Maggiore elasticità a basse temperature	Alto costo	Applicazioni Stradali
	Migliore resistenza alla deformazione e alla dilatazione alle alte temperature	Resistenza alla penetrazione ridotta	Impermeabilizzazioni
	Elasticità molto buona	Maggiore viscosità alle temperature di processo	
	Incremento della resistenza al rutting	Resistenza al calore e all'ossidazione	
	Maggiore adesività bitume-aggregato Buona stabilità della miscela quando usata in basse percentuali	Il bitume base deve avere un alto contenuto di aromatici e basso contenuto di asfaltini	
Stirene-Butadiene-Gomma (SBR)	Buona stabilità all'invecchiamento.	Scarsa resistenza ad ossigeno, ozono, radiazioni UV ed agenti ossidanti	Applicazioni Stradali
	Ottima stabilità nei confronti di sostanze quali olii minerali, grassi e idrocarburi, acidi e basi organiche ed inorganiche.	Incompatibilità con olii minerali, vegetali ed animali, idrocarburi alifatici, aromatici e clorurati	Impermeabilizzazioni
	Migliore resistenza alla deformazione permanente, alla fatica, alla lacerazione, all'usura.	Temperature d'esercizio comprese tra i -45 e i +100 °C	
Terpolimero etilene-propilene (EPDM)	Maggiore capacità di Dispersione	Non facile miscibilità con il bitume	Impermeabilizzazioni
	Necessarie alte percentuali per avere miglioramenti apprezzabili delle performance	A volte è necessario l'air blowing	
Gomma naturale (NR)	Maggiore resistenza al rutting	Sensibile alla decomposizione e all'assorbimento di ossigeno	Applicazioni Stradali
	Maggiore duttilità Maggiore elasticità	Alto peso molecolare (bassa compatibilità)	

Figura 20: caratteristiche degli elastomeri termoplastici

Polimero	Vantaggi	Svantaggi	Impieghi
Polietilene (PE)	Resistenza alle alte temperature	Difficile da disperdere nel bitume	Usi industriali
	Resistenza all'invecchiamento	Problemi d'instabilità	Applicazioni stradali
	Basso costo	Sono necessarie alte percentuali di polimero per raggiungere migliori proprietà No recupero elastico	
	Basso incremento di viscosità	Problemi di separazione	
Polipropilene (PP)	Alta T di rammollimento Bassa penetrazione	Nessun miglioramento in elasticità o proprietà meccaniche	Impermeabilizzazioni
	Allarga il range di plasticità e migliora la resistenza di carico della miscela	Bassa resistenza alla fatica indotta da escursioni termiche	
Etilene vinilacetato (EVA) Etilene metacrilato (EMA)	Notevole compatibilità e adesività	Nessun miglioramento nel recupero elastico	Applicazioni stradali
	Cambiamenti di viscosità minimi		Impermeabilizzazioni
	Termicamente stabile alle normali temperature di miscelamento e di trattamento		
	Bassi costi rispetto i polimeri a blocchi		

Figura 21: caratteristiche dei plastomeri

Riassumendo quindi i plastomeri e gli elastomeri formano generalmente una struttura reticolata che ingloba la fase bituminosa: la rete costituita dal polimero si rigonfia ma mantiene le sue caratteristiche, che si riflettono sulle proprietà del bitume. Il prodotto così ottenuto, pur conservando tutte le proprietà leganti della fase bituminosa, acquisisce le caratteristiche reologiche e prestazionali del polimero. La modifica del bitume permette di ottenere i seguenti vantaggi:

- maggiore flessibilità alle basse temperature operative;
- maggiore rigidità alle alte temperature operative;
- più ampio intervallo di elastoplasticità (maggiore ampiezza del campo di T di impiego);
- migliore correlazione tra viscosità e temperatura con riduzione della suscettività termica;
- maggiore resistenza ai carichi ed alla fatica;
- più elevato recupero elastico;

- maggiore coesione ed adesione agli inerti lapidei;
- maggiore resistenza all'invecchiamento (maggiore durata nel tempo del conglomerato);

La modificazione polimerica può rappresentare la miglior soluzione per potenziare le proprietà del bitume, ma è opportuno evidenziare alcune problematiche relative a tale tipo di lavorazione:

- bassa compatibilità polimero-bitume, che influenza la stabilità del sistema;
- più alte viscosità durante la lavorazione e l'applicazione;
- costi più alti di produzione.

Per produrre i bitumi modificati sono state sviluppate differenti procedure, che di volta in volta devono tener conto dei principali fattori che influenzano la velocità di dispersione del polimero nel bitume:

- peso molecolare medio, percentuale e grandezza delle particelle di polimero modificatore;
- condizioni di miscelamento (sforzo di taglio, temperatura e tempo di miscelazione)
- caratteristiche composizionali di bitume e polimero.

Durante la miscelazione il bitume viene gradualmente inglobato nella fase polimerica che lentamente rigonfia, assorbendo preferenzialmente i composti maltenici ed aumentando di volume. Il processo viene generalmente spinto sino alla cosiddetta "inversione di fase" che si verifica quando la fase polimerica diviene la fase continua ed il bitume la fase dispersa. In pratica, nonostante la percentuale in peso di polimero sia piuttosto modesta, la fase polimerica (ovvero polimero + bitume assorbito) diviene quella che predomina volumetricamente, nonché quella che determina le proprietà chimico-fisiche della miscela. Ecco perché il bitume cambia completamente comportamento reo-meccanico, giustificando così il termine "bitume modificato". E' possibile realizzare l'inversione di fase quando, a parità delle altre condizioni, il tenore di polimero supera un valore, detto di soglia, che dipende dal tipo di polimero, dal suo peso molecolare e non ultimo dal tipo di bitume impiegato.

1.7 ASPHALT RUBBER

Nel campo dei bitumi per uso stradale la produzione di leganti di prestazioni superiori avviene, come visto, attraverso la modifica del bitume con l'aggiunta di polimeri plastomeri, ad esempio del tipo EVA o, più diffusamente di elastomeri SBS o SBR. Tuttavia, sempre più frequentemente negli Stati Uniti ed in numerosi Paesi Europei il bitume modificato con polverino di gomma di pneumatico riciclata, noto come Asphalt Rubber, viene utilizzato quale valida alternativa per il confezionamento di conglomerati bituminosi di ottima durabilità e resistenti a severe condizioni di carico. L'uso dell'Asphalt Rubber, non solo costituisce una concreta applicazione per il riutilizzo dei pneumatici usati, ma risulta di estremo interesse anche come soluzione strettamente tecnica perché permette di ottenere bitumi e conglomerati ad alte prestazioni.

PRESTAZIONE DEI BITUMI
Aumento della durata del modificato dovuto all'aggiunta di antiossidanti
Riduzione del processo di invecchiamento del legante
Aumento significativo della viscosità e delle proprietà viscoelastiche del bitume
Fornisce una sottile pellicola di ricoprimento degli aggregati
Aumento del punto di rammollimento
Riduzione della suscettibilità del bitume alla temperatura
Migliora le proprietà del bitume alle basse temperature

PRESTAZIONE DEI CONGLOMERATI
Aumento della resistenza all'abrasione, soprattutto in zone soggette a neve
Riduzione dell'ossidazione
Aumento della durabilità
Incremento della resistenza a fatica
Riduzione della riflessione della fessurazione
Riduzione del fenomeno dell'ormaiamento
Riduzione della rumorosità
Possibilità di utilizzare minori spessori degli strati della pavimentazione
Riduzione del tempo di costruzione
Aumento della sicurezza durante la fase di costruzione
Risparmio di risorse energetiche e naturali
Minori costi di manutenzione

Si parla propriamente di Asphalt Rubber quando un bitume viene modificato con una percentuale minima del 15 % (tipicamente il 20%) di polverino di gomma di pneumatico riciclata, incorporata tramite processo wet, che ha reagito durante un periodo di tempo sufficientemente lungo da permettere ai due componenti una specifica interazione fisica. Il legante viene prodotto direttamente in opera, in stretta prossimità del cantiere stradale, tramite apparecchiature specializzate e ricorrendo a polverino di specifica granulometria. Il termine Asphalt Rubber è stato finora liberamente utilizzato: per alcuni rappresenta un tipo specifico di bitumi, per altri può definire un elenco più ricco di materiali. "Asphalt Rubber" è di fatto un tipo specifico di bitumi, che utilizza un tipo e una granulometrica specifica di gomma, e che viene prodotto direttamente in opera, in stretta prossimità del cantiere stradale, tramite apparecchiature specializzate.

ORIGINI (asphalt rubber)

Il primo impiego di gomma di pneumatico per modificare le proprietà del bitume risale agli anni 50, anche se fu solo nel 1963 che si realizzò la prima prova industriale di una certa rilevanza. Infatti, l'utilizzo del bitume modificato col polverino di gomma di pneumatico riciclata ha avuto inizio negli Stati Uniti, più di quarant'anni fa, dalla necessità di trovare un rimedio efficace per contrastare la propagazione delle fessure nelle pavimentazioni stradali flessibili, per lo più generate da gradienti di temperatura particolarmente elevati che danno origine a tipici fenomeni di stress termico. Mentre sviluppava un metodo per riparare i difetti più comuni nelle pavimentazioni di Phoenix in Arizona, Charles H. MacDonald ha provato ad aggiungere polverino di gomma a bitume liquido, eseguendo vari esperimenti con questo nuovo materiale ottenuto, mediante uno dei quali ha notato che, a seguito della miscelazione continua di polverino con bitume per più di quarantacinque minuti, si ottenevano nuove proprietà molto curiose ed interessanti. Il materiale acquisiva un comportamento che univa quello elastico della gomma con quello viscoso del bitume, e decise di battezzare tale materiale "Asphalt Rubber".

Il suo lavoro sperimentale ha portato al brevetto della tecnologia che è tuttora descritta come il metodo McDonald o metodo wet ("umido") per la fabbricazione di Asphalt Rubber. Il primo utilizzo fu finalizzato alla creazione di "cerotti" per la riparazione di buche presenti lungo le pavimentazioni stradali, ed ha funzionato talmente bene che l'Asphalt Rubber ha cominciato ad essere utilizzato come legante per chip seals. Durante i primi utilizzi, il polverino di gomma veniva sparso dall'alto di un autocarro e quindi mescolato facendo alternativamente avanzare e retrocedere il veicolo. Quest'applicazione è oggi conosciuta come SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer), ed entrambe le utilizzazioni, SAM (Stress Absorbing Membrane) e SAMI, hanno avuto ottimi risultati tanto da portare nel 1975 ad incorporare per la prima volta con successo il polverino nel bitume. Successivamente tramite delle indagini è stato riscontrato che l'asphalt rubber può essere utilizzato come membrana per controllare la deformazione delle pavimentazioni e per ridurre la propagazione della fessurazione in strati di pavimentazione sia rigide che flessibili. Inoltre si è giunti alla conclusione che poteva essere utilizzato anche per la produzione di conglomerati, mettendo in evidenza come tale bitume porterebbe il conglomerato stesso ad avere caratteristiche adatte per la realizzazione di strati di usura per riabilitare pavimentazioni fessurate.

Oggi date le sue caratteristiche, l'Asphalt Rubber viene preferibilmente utilizzato come strategia di riabilitazione. Il metodo di dimensionamento del rinnovo si basa su di una metodologia standard di progetto che permette la sostituzione parziale di strati in materiali convenzionali con strati in Asphalt Rubber di spessore inferiore. Quando gli HMRA vengono utilizzati nella costruzione di pavimentazioni nuove, si deve valutare lo spessore da applicare, fortemente dipendente dal modulo E della fondazione e degli strati di base, dal momento che la riduzione dello spessore può condizionare la capacità strutturale del pacchetto stradale. Così, uno strato in HMRA, rispetto ad uno strato di conglomerato convenzionale, può presentare una riduzione di spessore fino al 50% (fino a 60 mm di riduzione), nel caso si tratti di uno strato convenzionale.

PROCESSO DI FABBRICAZIONE DEL POLVERINO

Il polverino di gomma di pneumatico riciclata è costituito principalmente da gomma naturale sintetica, carbone nero, zolfo, zinco ossidato e agenti coloranti. I pneumatici vengono macinati attraversando diverse fasi sequenziali al fine di rimuovere filamenti, fibre e frammenti metallici, fino ad arrivare a una gradazione che permetta di produrre poverino di gomma.

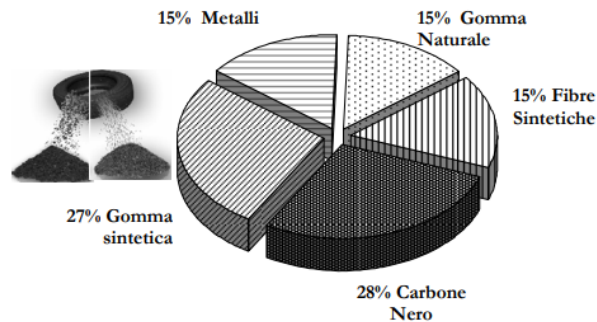


Figura 22: Composizione di un pneumatico tipico per automobili

Il granulato di gomma può essere ottenuto attraverso un processo ambientale, ottenuto meccanicamente tagliando la gomma in strisce alla temperatura ambiente, oppure attraverso il processo criogenico, che prevede di portare la gomma a temperature molto basse mediante azoto liquido, **rendendola** fragile e fratturandola con colpi di maglio. Durante la fase di triturazione la gomma subisce diversi cambiamenti, e le caratteristiche che rivestono particolare importanza nel prodotto ottenuto sono la morfologia della superficie della particella di gomma e la granulometria del polverino. A queste si aggiunge la superficie specifica delle particelle, che costituisce un ulteriore fattore determinante per l'ottenimento di un prodotto adatto all'impiego in leganti e conglomerati bituminosi.

Processo criogenico: la macinazione dei pneumatici viene effettuata una volta raggiunta la temperatura in cui la gomma risulta fragile (tra -87°C e -198°C). Per portare a queste condizioni la gomma, viene collocata in un bagno di azoto, dove per temperature molto basse diviene estremamente fragile e può essere facilmente frantumata mediante una pressa, ottenendo particelle di dimensione prefissata. Il risultato di questo processo è un granulato di gomma avente superficie praticamente liscia. La morfologia della gomma triturata è il fattore che influenza maggiormente le proprietà elastiche conferite alla miscela finale, le quali risultano migliori al diminuire del peso specifico e della dimensione delle particelle e all'aumentare della porosità della superficie dei granuli. L'introduzione nel legante mediante processo wet di particelle di gomma a superficie liscia, come quelle ottenute tramite processo criogenico, comportano rispetto all'impiego di grani porosi un minor grado di reazione col bitume stesso e proprietà elastiche della miscela inferiori. Per questo il polverino realizzato mediante processo criogenico ha bisogno di essere irruvidito attraverso un ulteriore passaggio in un molino cracker rotermill o in un apparecchio equivalente, per poter avere una buona reazione tra polverino e bitume. Infine segue il tutto un setacciatura finalizzata alla separazione delle particelle secondo le dimensioni, eliminando eventuali sostanze contaminanti come acqua, fibre, minerali o metalli.

Processo ambientale: Tale processo, permette di ottenere un granulato caratterizzato da una morfologia più adatta alla reazione col bitume, nel quale le particelle di gomma presentano superfici irregolari e porose, molto più estese rispetto a quelle delle particelle ottenute per via criogenica.

Seguendo tale metodo viene effettuata una triturazione meccanica alla temperatura ambiente, effettuata per mezzo di lame e coltelli rotanti. Una volta separato dal materiale metallico, il granulato di gomma così ottenuto presenta una granulometria variabile tra 0.5 e 5 mm.

Originariamente il polverino di gomma impiegato nella produzione di Asphalt Rubber proveniva dal processo ambientale e, principalmente, da pneumatici di automobili. La normativa ASTM D 6114 è stata sviluppata proprio sulla base di questo tipo specifico di polverino. In particolare, il pneumatico di un'automobile è formato approssimativamente dall'85% di gomma e dal 15% di fibre di ferro e carcasse di poliestere. Dopo la vita economica, la percentuale di gomma nel pneumatico si riduce all'83% mentre la quantità di fibre di ferro rimane inalterata. I pneumatici di camion sono composti da una maggior percentuale di gomma naturale rispetto a quelli di automobile. Per produrre un granulato di gomma idoneo all'introduzione nelle miscele bituminose, pertanto, viene suggerito dalla letteratura di tenere opportunamente conto di queste differenze, utilizzando, di conseguenza, adeguate percentuali di gomma da pneumatici di autocarro e autovetture. Il processo criogenico presenta l'importante vantaggio che tutta la gomma ottenuta può essere utilizzata per la produzione di Asphalt Rubber, senza perdite di materiale, comportando un risultato molto importante dal punto di vista economico. Questo tipo di processo riduce, quindi, i costi di produzione, origina un minor scarto, la produzione risulta più uniforme e ha la capacità unica di produrre direttamente ed efficientemente una elevata quantità di materiale molto fine. Inoltre, se si sottopone il polverino ottenuto mediante tale processo ad un successivo trattamento rotermill, si ottiene un prodotto avente caratteristiche ottimali per la reazione col bitume. Tale conclusione, se da un lato compensa gli svantaggi precedentemente citati riguardo al processo criogenico in termini di rugosità del granulato, dall'altro suggerisce di sottoporre sempre il materiale così ottenuto a un ulteriore trattamento rotermill.

IMPIEGO DEL POLVERINO

L'impiego più diffuso del polverino è per la realizzazione di conglomerati bituminosi che hanno caratteristiche fonoassorbenti e antivibranti, e se dosato opportunamente con gli altri componenti si riesce ad ottenere conglomerati che oltre ad essere fonoassorbenti sono anche drenanti. Questi conglomerati bituminosi possono essere realizzati mediante un **processo dry** oppure un **processo wet**, che variano una dall'altro in base a come viene incorporato il polverino nei manti asfaltici.

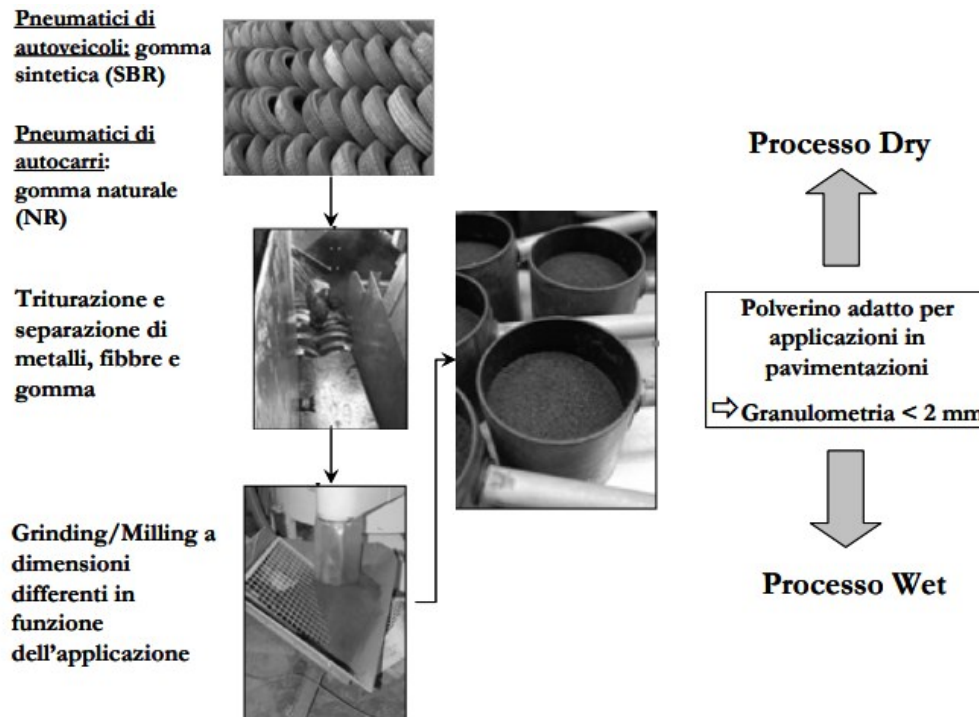


Figura 23: Composizione di un pneumatico tipico per automobili

Processo wet: è il processo più diffuso che consiste nella modifica del bitume nelle fasi che precedono il confezionamento in centrale dei conglomerati. Risulta essere un processo di riciclaggio che riguarda la formulazione del legante. Con tale termine vengono, infatti, indicati tutti i metodi tramite i quali il polverino di gomma viene miscelato con il bitume prima di aggiungere il legante risultante agli aggregati, e che richiede l'impiego di apparecchiature specializzate. Nel processo wet, quando il polverino di gomma (CRM) viene unito al bitume, a seguito della reazione tra i componenti si forma un legante modificato che, introdotto in un conglomerato bituminoso (Hot Modified Asphalt - HMA), origina il cosiddetto Hot Modified Rubber Asphalt Mixes (HMRA). In tale processo, un impianto specifico mescola il polverino di gomma con il bitume base in quantità ben precise (che nel caso dell'Asphalt Rubber è normalmente del 20% di polverino e 80 % di bitume), controllate da un sistema computerizzato. La miscela viene poi trasferita in un serbatoio dove viene agitata ad una velocità costante, sempre controllata elettronicamente, per un periodo di tempo che viene definito "periodo di reazione" e che normalmente è compreso tra 45 e 60 minuti. Successivamente si controlla la viscosità del legante così ottenuto, ovvero Asphalt Rubber, al fine di verificare che abbia raggiunto un valore compreso nel range specificato nella normativa ASTM D6114. Una volta raggiunta la viscosità adeguata, il processo di reazione fra bitume e gomma è completo e l'Asphalt Rubber viene pompato nell'impianto di produzione del conglomerato bituminoso, dove viene miscelato con gli aggregati. Si ottiene così un Hot Modified Asphalt. Il fatto di incorporare una percentuale di gomma così elevata nel bitume, porta ad un aumento significativo della viscosità (secondo la norma, la viscosità a 175°C, dopo 45 minuti di reazione, deve essere compresa fra i 1500 cP e i 5000 cP, valori molto al di sopra di quelli ottenuti per bitumi modificati con polimeri). È questa viscosità elevata che permette di utilizzare una percentuale più elevata di legante nel HMRA, requisito fondamentale per

l'ottenimento delle prestazioni volute da questo tipo di conglomerati, in particolare per quanto riguarda la riflessione della fessurazione. Altre possibili applicazioni del Processo wet si hanno, inoltre, nel campo dei trattamenti superficiali, delle membrane (SAM e SAMI) e della sigillatura delle fessure.

Tra le modifiche tramite processo wet si possono distinguere due filoni. Il primo e più utilizzato ricorre ad installazioni concepite per fabbricare AR direttamente in cantiere, in prossimità dell'impianto di produzione del conglomerato bituminoso, in modo da evitare la necessità di immagazzinare e trasportare il prodotto in cisterne. La metodologia più recente di praticare la modifica wet consiste, invece, nella produzione di bitumi modificati con polverino, dalle caratteristiche simili a quelli modificati con polimeri, in centrali di produzione molto simili a quelle utilizzate per la produzione di questi ultimi. Il prodotto viene così immagazzinato, controllato e trasportato tramite cisterne, ed in tal modo l'impianto di produzione non necessita di essere installato in prossimità dell'impianto di produzione dei conglomerati a caldo.

Le applicazioni ottenute tramite processo wet sono quelle nettamente più diffuse, come anticipato, il termine Asphalt Rubber viene definito secondo la norma ASTM D6114-97 come una miscela di legante bituminoso con un contenuto pari almeno al 15% in peso di gomma di pneumatici riciclata, oltre a determinati additivi, e nella quale la gomma ha reagito col bitume ad elevate temperature in modo sufficiente da provocare il rigonfiamento delle proprie particelle. Durante la reazione col bitume il CRM rammollisce e rigonfia in maniera diversa a seconda della temperatura di miscelazione, del tempo durante il quale tale temperatura si mantiene, del tipo e energia di miscelazione meccanica imposta, oltre che in funzione di morfologia e dimensioni del CRM e dell'eventuale presenza di aromatici nel bitume. Ai fini di ottenere un buon rigonfiamento del granulato, conviene utilizzare bitumi molli o aggiungere oli aromatici, dal momento che durante la reazione gli oli aromatici presenti nel bitume vengono assorbiti all'interno delle catene polimeriche che costituiscono i componenti principali della gomma, sia naturale che sintetica. L'aggiunta dell'olio aromatico al bitume modificato con polverino rende meno duro il legante a temperatura ambiente, soprattutto per elevati contenuti in gomma. Un altro accorgimento da tenere consiste nel confezionamento del conglomerato in tempi brevi dopo la preparazione del legante, e comunque dopo non più di 16 ore, ai fini di evitare un decadimento delle proprietà reologiche dello stesso. Dalla pratica è risultato che conviene, comunque, evitare di mantenere riscaldate le miscele che non trovano impiego immediato, facendole invece raffreddare e riscaldandole solo al momento del loro impiego.

Processo dry: in questo processo il polverino di gomma viene mescolato all'aggregato prima dell'aggiunta del bitume al conglomerato, e non necessita di apparecchiature specifiche per la produzione e la posa in opera. Tramite processo dry si ottiene un conglomerato caratterizzato dalla sostituzione di una parte dell'aggregato con il granulato di gomma, definito Rubber Modified Asphalt Concrete (RUMAC). Il prodotto originato tramite tale tecnica viene denominata Rubber Modified Asphalt o Rubberized Asphalt e, grazie a costi di produzione inferiori rispetto al metodo wet, è stato utilizzato negli Stati Uniti in molteplici occasioni. I 30 anni della sua applicazione hanno manifestato, però, una performance a lungo termine inferiore rispetto al metodo wet, portando a non considerare tale materiale come una scelta economicamente conveniente per la riabilitazione di pavimentazioni. Tale differenza di performance deriva da due considerazioni, la prima delle quali è legata alla difficoltà di ottenere una distribuzione uniforme del polverino quando addizionato al conglomerato come filler, portando alla fessurazione in minor tempo, a causa di fenomeni di riflessione della fessura che portano frequentemente alla disgregazione della superficie stradale. La seconda riguarda il tempo di reazione relativo all'interazione fra bitume e gomma. Il polverino di gomma sostituisce, infatti, il filler nella composizione granulometrica del conglomerato e, a causa del breve tempo di miscelazione, non si verifica una reazione sufficientemente significativa fra bitume e gomma. Inoltre, il comportamento della gomma in questo caso risulta più complesso e difficile da governare, in quanto non si comporta esattamente come un inerte, dal momento che mediamente circa il 10% interagisce

col bitume. Le miscele stradali così ottenute necessitano di una maggior quantità di legante. Esistono, prodotti commerciali ottenuti tramite questo tipo di processo che permettono un miglioramento delle caratteristiche di fono assorbente, alle quali si accompagnano migliori caratteristiche di aderenza, oltre che una riduzione delle vibrazioni e del cracking termico. Se eseguita a regola d'arte, l'applicazione di questi conglomerati produce buoni risultati sia in climi caldi, sia in climi freddi, consentendo generalmente di riciclare una maggior quantità di gomma rispetto ai processi wet. Nelle miscele di tipo RUMAC, infatti, il granulato di gomma introdotto rappresenta dal 2.5 al 5% in peso dell'aggregato, ossia da due a quattro volte il quantitativo di gomma impiegabile nel processo wet, con i conseguenti vantaggi ambientali. Gli svantaggi di tale processo derivano, oltre che dai maggiori costi rispetto ai conglomerati convenzionali, dovuti alla necessità di ricorrere ad aggregati specialmente gradati per permettere fisicamente l'incorporazione del polverino di gomma, dal fatto che un errore nel loro confezionamento non consente di effettuarne correzioni successive, dando così origine a problemi di compattazione, sgranamento e perdita di materiale in opera.

Quindi le principali caratteristiche dei conglomerati bituminosi con polverino possono essere riassunte in sette punti fondamentali:

- Ottime performance
- Manutenzione ridotta
- Buoni livelli di funzionalità e sicurezza
- Fonoassorbente
- Efficienza economica
- Riciclabilità
- Versatilità e tempi di costruzione brevi

Ottimo performance: visualizzando e confrontando due tratti di pavimentazione (Figura 24), realizzato con uno strato di 10 cm con conglomerato bituminoso tradizionale (foto a sinistra) mentre l'altro realizzato con uno strato di 5 cm con Hot Modified Rubber Asphalt Mixes (foto a destra), a distanza di 8 anni dalla messa in servizio della pavimentazione. Possiamo vedere l'elevata performance dei conglomerati realizzati con l'aggiunta di polverino sia per quanto riguarda la capacità strutturale che, soprattutto per la resistenza alla fessurazione. La fessurazione alle basse temperature inizia dallo strato di usura e progredisce verso lo strato di fondo, l'asphalt rubber ha dimostrato di possedere una resistenza eccezionale alla fessurazione.



Figura 24: Confronto di due tratti di pavimentazione realizzati con materiali diversi

Manutenzione ridotta: Le pavimentazioni in Asphalt Rubber, quando ben progettate e costruite, consentono una riduzione significativa della manutenzione. Tramite degli studi condotti dopo dieci anni le pavimentazioni in asphalt rubber presentano una riduzione del 66% dei costi di manutenzione, legata soprattutto ai minori processi di fessurazione che si verificano in questo tipo di conglomerati.

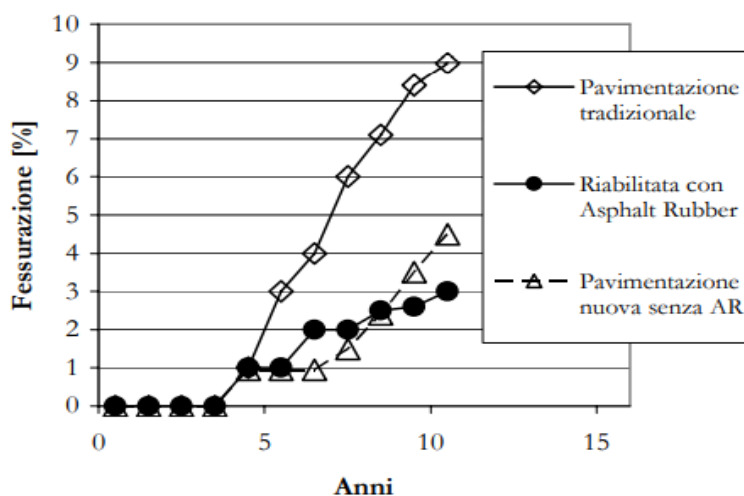


Figura 25: Evoluzione della fessurazione nelle pavimentazioni

Buoni livelli di funzionalità e sicurezza: La maggior parte di queste superfici continuano a presentare eccellenti valori di aderenza, tessitura e regolarità, mentre in una pavimentazione convenzionale peggiorano già dopo un anno dalla costruzione, infatti anche a dieci o più anni dalla costruzione sono stati misurati ottimi valori di Skid Resistance. Una pavimentazione stradale, per poter garantire la necessaria sicurezza della circolazione, deve assicurare un insieme di caratteristiche prestazionali essenziali, quali la portanza, la regolarità e l'aderenza, in particolare l'aderenza, ovvero l'insieme delle forze di attrito che si trasmettono tra pavimentazione e pneumatico lungo le rispettive superfici di contatto. L'effetto dell'aderenza, oltre a consentire l'avanzamento stesso del veicolo, risulta particolarmente importante nella fase di frenatura, durante la quale è decisivo evitare lo strisciamento dei pneumatici sul piano stradale, specialmente in caso di superficie bagnata per evitare l'innescò della condizione dinamica nota come aquaplaning, funzione della velocità e dallo spessore del velo d'acqua. I conglomerati drenanti, o semi-drenanti, offrono ulteriori vantaggi come la riduzione dei fenomeni di splash and spray (Figura 26) sotto la pioggia perché in caso di pioggia, l'asfalto poroso, dapprima assorbe l'acqua evitando che si fermi in superficie, poi la incanala fino a scaricarla ai lati della strada.



Figura 26: differenza tra le pavimentazioni durante la pioggia

Fonoassorbenza: il rumore generato dal traffico stradale è un suono indesiderato generato da una variazione di pressione dell'aria e dal rotolamento dello pneumatico sullo strato superficiale della pavimentazione. Quindi possiamo dire che il rumore del traffico veicolare è influenzato da diversi fattori tra cui: peso del veicolo, velocità di accelerazione del veicolo e caratteristiche della superficie stradale. Il contatto pneumatico-superficie stradale genera un'ampia gamma di onde sonore che, in base alla frequenza, risultano più o meno percettibili, sono più fastidiose quelle medio-alte, cioè quelle intorno a 1800-2000 Hz. L'identificazione delle sorgenti del rumore, ha consentito agli studiosi di comprendere il fenomeno nella sua complessità ed individuarne le cause per una possibile riduzione.

Un veicolo carico in movimento genera vibrazioni che si trasmettono dal motore al fondo stradale alla carrozzeria. Il pneumatico nel suo avanzamento veloce, comprime l'aria davanti a sé, intrappolandola tra la scolpitura della gomma ed il fondo stradale. Il cuscinetto d'aria viene laminato sotto la ruota e si espande dopo il passaggio generando la risonanza nell'aria. La propagazione del rumore sarà tanto più alta quanto più liscia è la strada e quanto è meno scolpito il pneumatico. L'asfalto poroso aperto consente all'aria di passare sotto la zona di contatto senza comprimersi troppo; per questo motivo è decisamente importante la macrotessitura della superficie stradale. In fase di rilascio, a valle della zona di contatto, l'onda acustica esce più smorzata e rimbalza sotto la scocca del veicolo in movimento con minore pressione e quindi con meno rumore. L'energia che penetra nel conglomerato, risulta gradualmente dissipata per rifrazione fra i granuli di pietrisco. Più tortuoso è il percorso delle onde sonore nella massa, tanto maggiore è l'assorbimento. La riduzione del rumore di rotolamento sulle pavimentazioni porose è prevalentemente dovuta alle proprietà di assorbimento acustico di tali pavimentazioni. La soglia di velocità di 50 km/h rappresenta quel valore oltre il quale l'attrito pneumatico-strada supera per rumorosità qualsiasi altra causa di disturbo sonoro. La rumorosità è anche funzione della temperatura dell'aria, che interviene sulla densità e influenza la propagazione delle onde sonore.

L'uso di asphalt rubber ha consentito di registrare significative attenuazioni dei fenomeni di vibrazione da traffico veicolare e del rumore da rotolamento, con una riduzione fino a 13 dB del livello sonoro in ambiti urbani di circolazione. La pavimentazione maggiormente fonoassorbente è un gap-graded Asphalt Rubber, con emissioni sonore inferiori tra 4 e 7 dB rispetto alle soluzioni convenzionali, e sino a 13 dB in confronto ad una pavimentazione rigida. Ciò è dovuto alla maggior quantità di vuoti dello strato superficiale, in grado di attenuare gli aumenti di pressione dell'aria durante il transito di veicoli. Inoltre, l'elevato contenuto di legante e la presenza di gomma conferiscono un ridotto modulo elastico ed una maggior duttilità dello strato di usura, e le ridotte dimensioni dell'aggregato comportano una minor deformazione del pneumatico durante il rotolamento.

Efficienza economica: tramite un'analisi dell'intero ciclo di vita di questo materiale si è riscontrato che i benefici superano i costi iniziali, nonostante questi ultimi risultino in genere più elevati rispetto alle applicazioni convenzionali. I bitumi Asphalt Rubber possono essere utilizzati per realizzare conglomerati dalle prestazioni superiori, particolarmente per quanto riguarda la propagazione di fessure e la fessurazione termica. L'uso di questo tipo di miscele può essere economicamente giustificato a seguito dell'analisi costi-benefici. Il risparmio è in ogni modo funzione del mercato locale, dello stato della tecnologia disponibile e delle soluzioni strutturali adottate. I costi unitari dei leganti Asphalt Rubber sono più elevati rispetto ai leganti tradizionali, sia che si tratti di bitumi non modificati che di bitumi modificati con polimeri.

È stata anche eseguita un'analisi economica su quelli che potevano essere i vantaggi nei costi di gestione del veicolo da parte dell'utente per la durata della pavimentazione in Asphalt Rubber ed è risultato che determina un risparmio medio del carburante del 4.5% e consente di avere meno usura e problemi meccanici sul veicolo, risparmiando tempo e soldi.

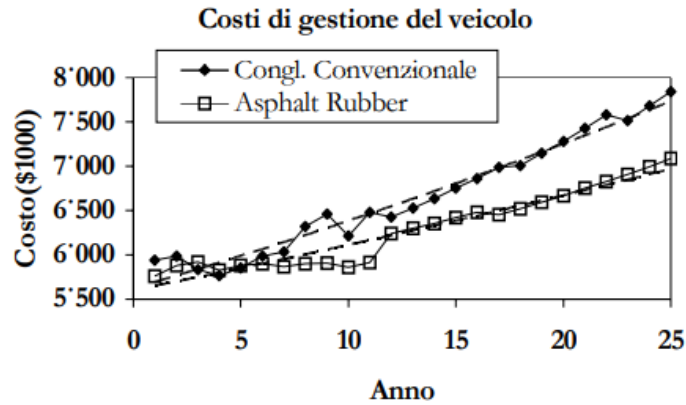


Figura 27: Costi di gestione del veicolo per l'utente nelle diverse età della pavimentazione

Riciclabilità: questo tipo di pavimentazioni possono essere completamente riciclate, non solo si possono riutilizzare gli aggregati, ma si è verificato che il bitume modificato con il polverino di gomma mantiene grande parte della sua adesività e può essere riutilizzato in un conglomerato. È stato dimostrato che un conglomerato in asphalt rubber riciclato al 100% ha le caratteristiche simili al nuovo conglomerato.

Versatilità e tempi di costruzione brevi: La versatilità dell'Asphalt Rubber si traduce in una varietà di possibili applicazioni in cui questo legante può essere impiegato con buone performance, come applicazioni spray (*Chip Seals, Interlayers, Cape Seals*) oppure conglomerati a caldo (*chiuso, semiaperto, drenante, aperto*).

Dal momento che l'impianto di produzione di Asphalt Rubber è collocato vicino al cantiere, la fase di costruzione è più rapida; le pavimentazioni realizzate con queste miscele, inoltre, possono essere aperte al traffico quasi immediatamente dopo la compattazione, causando minor disagio all'utente. Un altro aspetto che contribuisce a ridurre i tempi di costruzione riguarda la riduzione dello spessore degli strati. Inoltre la costruzione con asphalt rubber è più veloce e questo implica un minor disturbo del traffico visto che può essere utilizzato in spessori minori, il processo costruttivo. Utilizzando spessori minori si ottiene anche un risparmio di energia e delle risorse naturali.



Figura 28: Esempio di impianto mobile per la produzione di asphalt rubber

1.8 IMPIANTI DI PRODUZIONE

Gli impianti per la produzione dei conglomerati bituminosi sono molto costosi e complessi. Di questi ne possiamo trovare di **fissi** che sono collocati lontano dai centri abitati in modo permanente, ma non ad un specifico cantiere. Oppure di **mobili**, cioè trasportabili per un migliore utilizzo in cantiere attraverso un semirimorchio. Gli impianti si possono dividere in **continui** e **discontinui**, in genere quelli mobili sono continui perché più piccoli, mentre i fissi sono discontinui. I continui sono meno costosi e più facili da gestire ma nel nostro paese sono meno diffusi perché richiedono una produzione costante, senza nessuna interruzione e senza grandi variazioni di miscela. Viceversa gli impianti mobili sono in genere ad uso di più cantieri, magari anche più piccoli dove si richiedono continue variazioni di miscele, per questo sono più versatili rispetto ai continui. Nei conglomerati bituminosi molto importante è la distanza tra l'impianto di produzione e il cantiere che non deve essere troppo elevata perché un intervallo di tempo troppo elevato tra la produzione e la stesa può provocare un eccessivo raffreddamento determinando le caratteristiche non idonee per la messa in opera.

Impianto discontinuo: Questa tipologia di impianto sono tra i più diffusi perché soddisfano le esigenze di più clienti nello stesso arco temporale, in quanto consente di cambiare facilmente la formula, garantendo un alto livello di qualità. La particolarità che li distingue da quelli continui è la presenza a valle di un tamburo di riscaldamento ed essiccazione, di una torre di miscelazione dove il conglomerato bituminoso viene prodotto in modo ciclico anziché continuativo, in quantità ben precise. È il tipo di impianto più diffuso al mondo ed anche quello che consente la maggiore flessibilità di utilizzo e la maggiore sicurezza della qualità del prodotto finito. La discontinuità è collegata al tipo di esercizio: ogni 40-50 secondi viene realizzato un impasto completo con tutti i vari componenti, pesati e dosati separatamente.

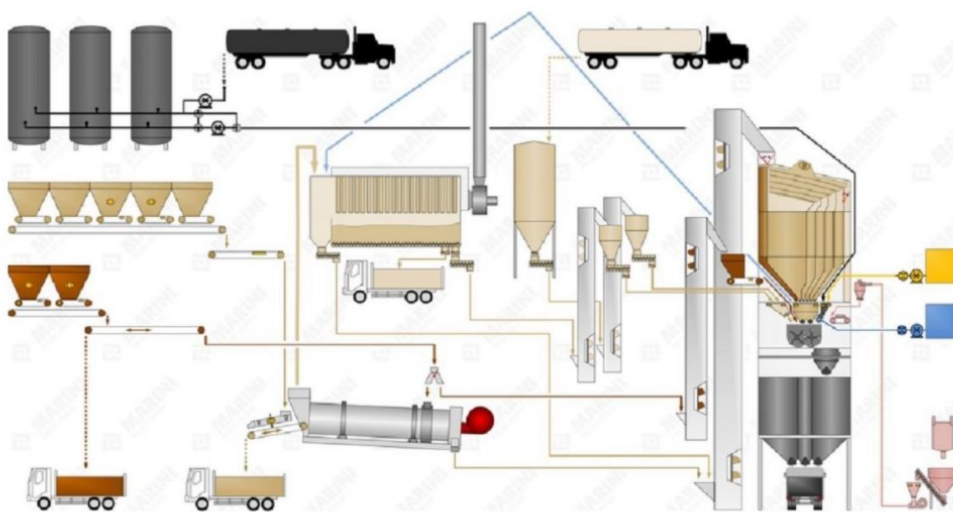


Figura 29: Impianto fisso discontinuo

Il processo produttivo si distingue in due fasi:

- 1- Delle pale meccaniche prelevano gli aggregati dai vari cumoli delle varie granulometrie e le immettono nelle vasche. Gli aggregati prelevati tramite delle apposite tramogge, ciascuno per una frazione granulometrica, vengono immessi all'interno del tamburo coerenti con la distribuzione granulometriche richiesta e successivamente vengono riscaldati ed essiccati in controcorrente cioè gli aggregati entrano in senso opposto al bruciatore e scorrono contrario rispetto ai gas di scarico, ottenendo un rendimento termico notevolmente maggiore rispetto al flusso del continuo, dove il legante doveva essere tenuto ad una certa distanza dalla fiamma. I gas di scarico vengono convogliati verso un filtro per le polveri, che vengono tratteneute e

stoccate in appositi silo per poi essere utilizzate come filler al momento della miscelazione. L'essiccazione degli aggregati all'interno del tamburo rotante è molto importante perché permette di eliminare l'acqua presente all'interno di essi in modo che il bitume essendo un materiale idrofobo (ovvero non lega in presenza di umidità), possa aderire bene nell'intorno della superficie degli aggregati.

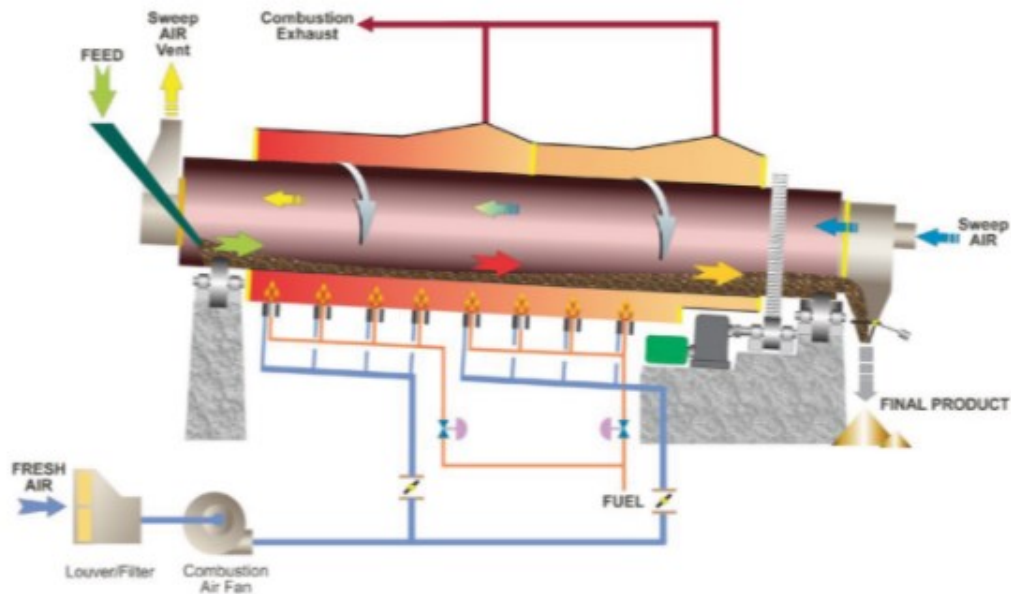


Figura 30: Tamburo rotante di essiccazione

- 2- Gli aggregati vengono trasportati tramite un elevatore a tazze nella parte alta della torre di miscelazione dove vi è l'unità di selezione dotata di vagli vibranti, contenitori di stoccaggio, il sistema di pesatura e il miscelatore. I vagli vibranti sono disposti in ordine di dimensioni crescente, provvedendo ad una seconda riclassificazione degli aggregati, separando le frazioni ottenute. La riselectone si fa perché nella prima parte il materiale è umido, non sappiamo se abbiamo ottenuto la giusta ricetta oppure è stata pesata molta acqua. È opportuno che l'area dei vagli sia adeguata al quantitativo di materiale che arriva dall'essiccatore e alla capacità del miscelatore. Infatti in caso di intasamento di un vaglio, gli aggregati più piccoli tendono a galleggiare al di sopra di quelli grossi, finendo poi nel contenitore di quelli più grossi causando al momento della miscelazione una miscelazione con più fino del previsto, con caratteristiche di minore ricoprimento da parte del legante. Per vedere se viene realizzato il mix che ho previsto in progetto, basta controllare la quantità di aggregati consumati, soprattutto del fino.

Gli aggregati dosati vengono poi scaricati all'interno del miscelatore, con l'eventuale aggiunta di bitume, additivi e filler. Il peso del bitume da immettere viene determinato con una funzione matematica che si basa sul peso degli aggregati e viene immesso mediante tubazioni pompate riscaldate. Il mescolatore è costituito di due alberi paralleli controrotanti per ottenere un ottimo ricoprimento degli aggregati dal bitume. Con il miscelatore discontinuo si fa un impasto di circa una tonnellata ogni 20-25 secondi. Infine il conglomerato può essere scaricato direttamente sul mezzo o va in un silo di stoccaggio per non fare aspettare i camionisti. Con la chiusura dello scarico del miscelatore ha inizio un nuovo ciclo.

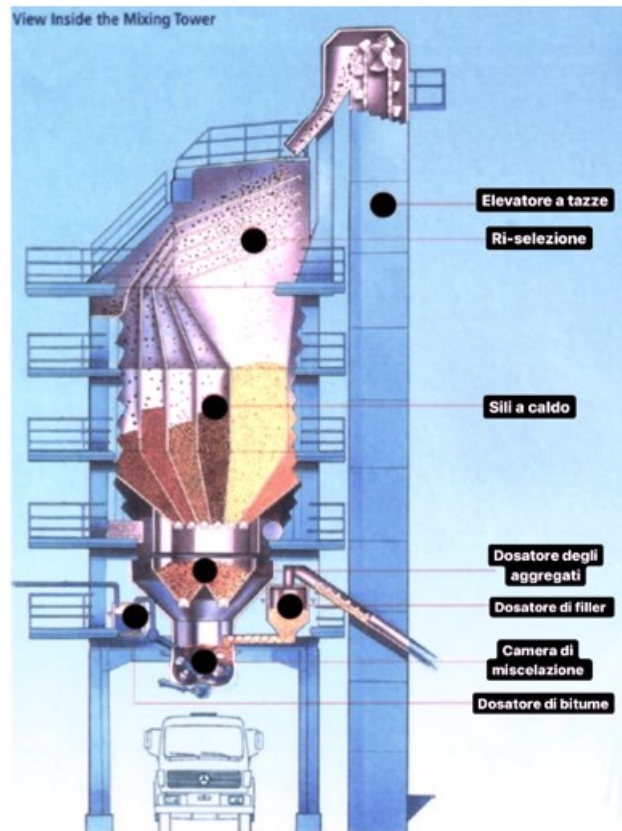


Figura 31: Torre di miscelazione

Negli impianti discontinui è prevista l'immissione nel processo di produzione di conglomerato bituminoso di recupero con modalità differenti. Il fresato può essere fatto di grumi per questo è bene che si faccia un'analisi granulometrica e preveda almeno 3 classi di fresato per ottenere un buon mix design. La prima scelta, più semplice, che incide poco sul processo produttivo prevede l'inserimento del fresato freddo e umido direttamente nel mescolatore. Il riscaldamento avviene direttamente con il contatto con gli aggregati vergini nella fase di miscelazione, dove però parte del bitume si volatilizza (per questo bisogna metterne poco), e in tal caso si prevede un incremento di temperatura degli aggregati di 40-50°C per non danneggiare il bitume nuovo, limitando la quantità di fresato utilizzabile fino ad un massimo del 10-15%. Altre modalità prevedono l'inserimento del RAP all'interno del cilindro essiccatore o dell'elevatore a tazze così da avere un buon riscaldamento del conglomerato riciclato aumentandone le possibilità d'impiego fino al 30-40%. Però in questo caso possiamo avere delle problematiche all'impianto perché il bitume rammollito per il riscaldamento rischia di intasare i vagli. Per far fronte a questo problema in questo caso il sistema di ri-selezione viene in genere bypassato tramite l'immissione diretta nel mescolatore degli aggregati vergini e del rap. Quando il fresato passa all'interno del cilindro rotante però può succedere che il bitume a contatto con la fiamma bruci e produca dei fumi tossici che vanno a intasare i filtri, per questo in questi casi si preferisce utilizzare dei sistemi che riscaldano il bitume per irraggiamento e non con la fiamma alimentata a metano. Quest'ultimo rimane il metodo migliore e combinando i metodi di inserimento possono aumentare le quantità di RAP fino al 60%. Per superare tale limite l'impianto dovrebbe essere dotato di due linee di tamburi, uno per gli aggregati vergini e uno per il RAP in modo da incrementare ancora di più l'utilizzo del riciclato.

Impianto continuo: in questo tipo di impianto il conglomerato viene prodotto con un flusso continuo. Possiamo distinguere due tipologie di impianti continui: quelli noti come drum mixer e quelli con miscelatore esterno.

IMPIANTI DRUM MIXER dove gli aggregati da utilizzare vengono trasportate dalle cave di estrazione e produzione al piazzale dell'impianto, dove vengono stoccate in cumuli che si differenziano per granulometria. Siccome non è prevista una fase di preselezione bisogna fare particolare attenzione che le classi non subiscono delle contaminazioni. Il numero minimo di tramogge affinché dipende dalle classi che si vuole utilizzare, in genere sono 5-6, al di sotto dei quali sono collocati dei nastri estrattori muniti di celle di carico. La variazione di velocità dei nastri permette di dosare la quantità di materiale prelevato da ogni tramoggia. Questi vengono poi scaricati su un nastro collettore che pesa in continuo gli aggregati, ed essendo questi materiali umidi bisogna determinare in continuo il tenore di umidità, per risalire alla massa secca e quindi alla percentuale di bitume da aggiungere in fase di miscelazione. Questo processo opera in corrente (meno efficace del discontinuo, però costa la metà, produce di più e in continuo), secondo ciò gli aggregati vengono immessi di lato del bruciatore e vengono progressivamente essiccati muovendosi verso il lato opposto all'uscita. Il bitume viene immesso ad una certa distanza dalla fiamma (circa 2/3 del cilindro) dove la temperatura dei gas è ottimale, per evitarne la combustione. La miscela rimane nel cilindro per circa 3-4 minuti in relazione alla sua lunghezza e velocità di rotazione. Per quanto riguarda il filler può essere immesso all'interno del tamburo sia all'inizio che alla fine. Questo tipo di impianto rispetto a macchinari tradizionali permette un minor dispendio di energia dovuto alla presenza di un solo macchinario multifunzionale invece che più macchinari.

IMPIANTI CON MISCELATORE ESTERNO è tipologia di nuova concezione, dove a differenza del precedente il cilindro essiccatore funziona controcorrente, ottenendo un rendimento termico più elevato dal fatto che separando la miscela, non vi è il problema di tenere lontano il legante dalla fiamma. Questa tipologia di impianti è efficace per una linea unica perché poi la sera si procede facendo un giro a vuoto con soli inerti per pulire l'impianto, sprecando però del materiale.

I principali problemi stanno nel dosaggio degli inerti che deve essere controllato dagli impiantisti e non, ma che comunque non è possibile tenere perfettamente sotto controllo come nel discontinuo. Si possono avere problematiche legate alle temperature e all'umidità. Ne discontinuo gli aggregati sono sicuramente essiccati ma nel continuo non abbiamo questa certezza.

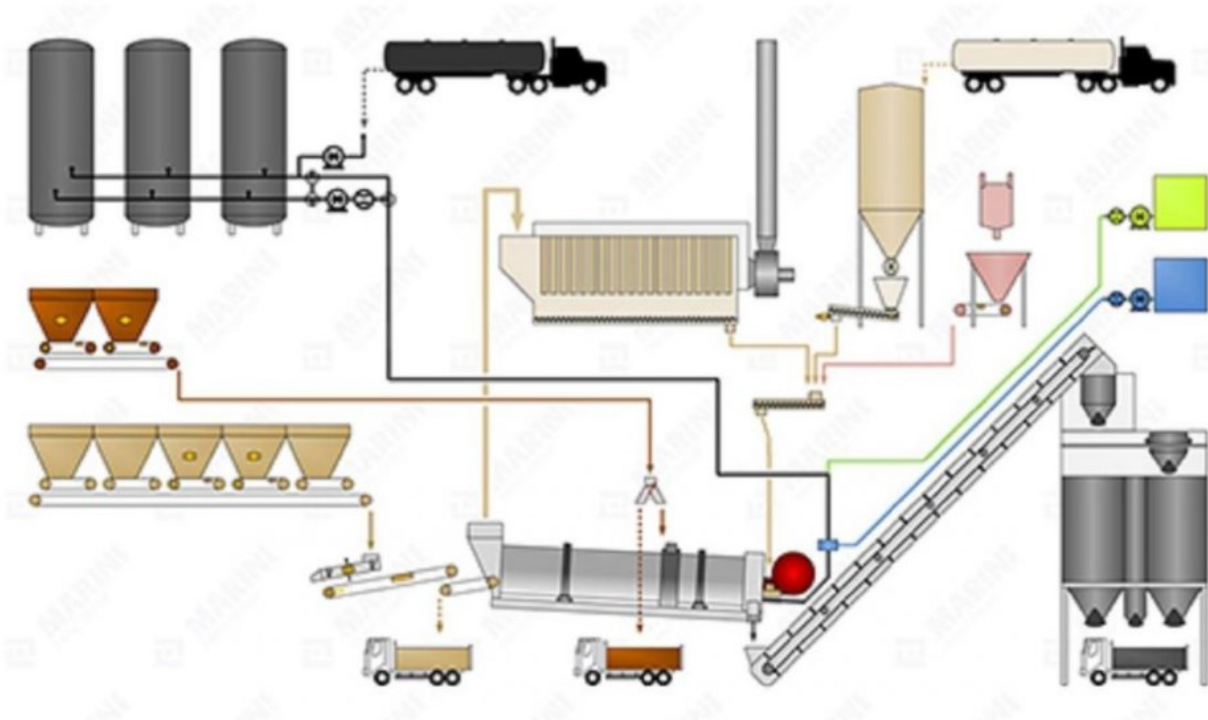


Figura 32: impianto fisso continuo

CAPITOLO 2: Programma sperimentale

2.1 OBIETTIVI

In questo capitolo vengono descritte le fasi operative svolte durante una sperimentazione condotta presso il laboratorio del dipartimento di “Ingegneria Civile, Edile e Architettura” dell’Università Politecnica delle Marche, illustrando il piano sperimentale, gli obiettivi da raggiungere, le tipologia dei materiali utilizzati, la procedura di preparazione dei provini e le prove di laboratorio effettuate sui provini fatti in sito e dei provini realizzati in laboratorio.

L’obiettivo di questa sperimentazione è confrontare le caratteristiche prestazionali del conglomerato bituminoso prodotto con polverino di gomma (asphalt rubber) con quelle dei conglomerati realizzati con bitume tradizionale e con bitume modificato hard.

Le fasi sperimentali in cui si è svolta la sperimentazione possono essere racchiuse in sette fasi:

FASE 1: il conglomerato viene messo in forno a 170°C per ottenere una miscela sciolta

FASE 2: il conglomerato sciolto viene compattato dentro delle fustelle di diametro 100mm mediante pressa giratoria

FASE 3: determinazione del peso sia in aria che in acqua e delle caratteristiche geometriche dei provini

FASE 4: esecuzione della prova ITSM per misurare il modulo di rigidezza a trazione indiretta

FASE 5: esecuzione della prova ITS per la determinazione della resistenza a trazione indiretta, della deformazione causata dalla rottura e del carico di rottura.

FASE 6: esecuzione della prova ITF per la determinazione della resistenza a fatica del materiale

FASE 7: realizzate tutte le prove necessaria si è proceduto all’elaborazione dei dati ricavati su un foglio di calcolo per poter confrontare i risultati dei provini prodotti con polverini di gomma con quelli tradizionali e con quelli realizzati con bitume modifica hard.

2.2 MATERIALI UTILIZZATI

I materiali utilizzati per la sperimentazione presso il laboratorio dell'università, derivano dalla miscela stesa in sito ed è stata portata in laboratorio sottoforma di:

- 1- conglomerato sfuso miscelato in impianto all'interno di sacchetti di carta. Per farlo diventare sciolto il modo da poterlo lavorare è stato messo in forno a 170°C e poi compattato attraverso pressa giratoria.



Figura 33: conglomerato sfuso

- 2- provini compattati direttamente in sito su cui sono state fatte prove così tal quale



Figura 34: provini compattati in sito

2.3 PRODUZIONE DEI PROVINI

Il conglomerato sfuso solido portato in laboratorio attraverso i sacchi è stato messo all'interno di una teglia e messo in forno a 170°C per circa due ore fino a quando non ha raggiunto una consistenza sciolta abbastanza malleabile. Una volta che la miscela ha raggiunto la consistenza ideale per poterla dividere, è stata porzionata in 15 parti uguali aventi il peso di circa 1100g ciascuno grazie all'utilizzo di una bilancia di precisione. Dopo sono state rimesse in forno le 15 teglie contenente il materiale porzionato per altri 50-60 minuti. Nello stesso tempo per il confezionamento dei provini siccome è stata utilizzata la **pressa a taglio giratoria**, la fustella utilizzata (di diametro di 100 mm) è stata messa in forno insieme alla miscela in modo che durante la compattazione il conglomerato non subisca un repentino raffreddamento al contatto con le pareti della fustella durante la compattazione.



Figura 35: bilancia di precisione

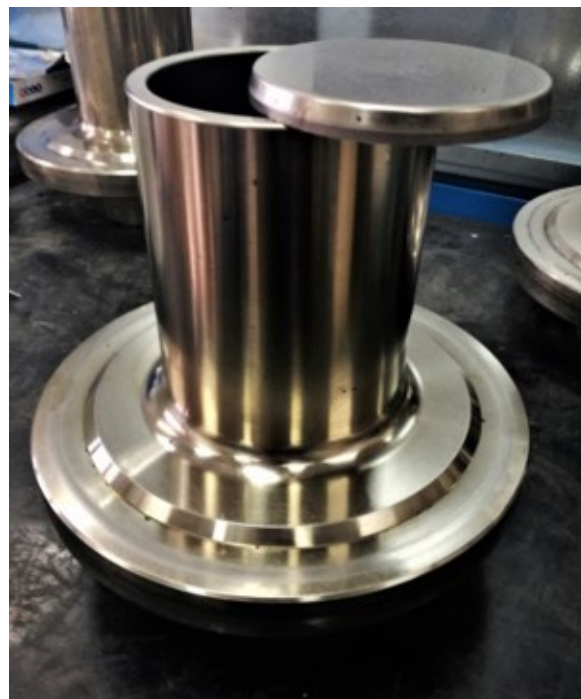
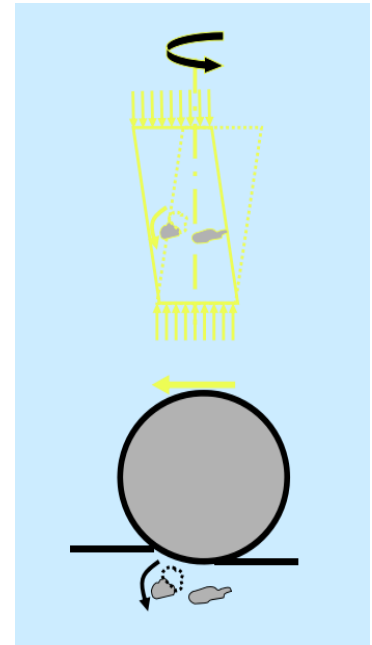
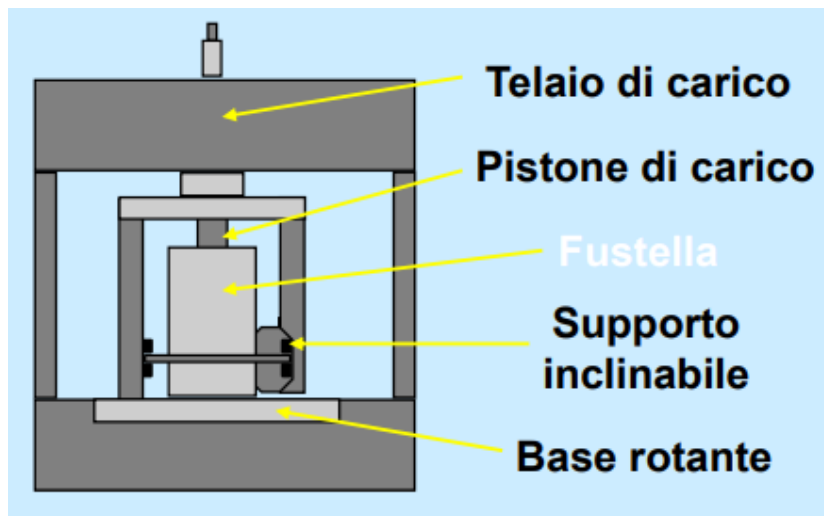


Figura 36: fustella da 100 mm

PRESSA A TAGLIO GIRATORIA (UNI EN 12697-31)

La pressa giratoria è una macchina che permette di preparare campioni cilindrici con caratteristiche di addensamento e di organizzazione interna dei granuli di aggregato molto simili a quelle ottenute mediante la compattazione dei rulli di cantieri. La compattazione giratoria determina, un mutuo incastro tra i grani dell'aggregato, formando così strutture aventi una distribuzione dei vuoti la cui forma ed entità è simile a quella che si registra in sito. Questo macchinario induce un'azione compattante mediante due meccanismi:

- 1- Pressione normale applicata per mezzo di un pistone idraulico
- 2- Sforzo di taglio applicato per la rotazione della fustella, che viene inserita nella pressa in maniera inclinata rispetto alla verticale.



Questa metodologia è preferibile rispetto a quella Marshall che sottoponeva la fustella ad un addensamento di 50 colpi per faccia, o più recentemente di 75 colpi per faccia, dove si creava un avvicinamento progressivo dei granuli che si interrompono all'atto della formazione di zone di saldo contatto.

Il conglomerato bituminoso collocato all'interno della fustella è sottoposto ad una pressione di addensamento verticale uniforme, la cui risultante avrà una direzione di applicazione inclinata rispetto all'asse della fustella, essendo quest'ultima inclinata di un angolo prefissato rispetto alla verticale. Simultaneamente, durante il processo di compattazione, il meccanismo di rivoluzione caratteristico della macchina distribuisce tale inclinazione della fustella uniforme attorno al proprio asse, ad una velocità costante prefissata. Così la compattazione giratoria determina una ridistribuzione degli aggregati, costruendo nuove strutture granulari aventi una distribuzione dei vuoti la cui forma e entità è analoga a quella che succede in sito. Grazie alla connessione con un computer è possibile monitorare in continuo l'altezza raggiunta dal provino ad ogni giro; i risultati possono essere visualizzati durante l'esecuzione della prova e salvati per una successiva elaborazione. La pressa giratoria è predisposta in modo tale da poter impostare i parametri di prova, quali l'angolo giratorio, la pressione da applicare (nel nostro caso 600kPa) e i numeri di giri. Una volta immessi i dati può avere inizio la prova e durante l'esecuzione un software ci mostra l'evolversi della prova e restituisce su un file come varia l'altezza del provino ad ogni giro compiuto dalla fustella. Oltre al controllo dello stato di addensamento si vanno ad analizzare le modalità con cui vengono raggiunte, tramite delle **curve di compattazione** (Figura 37) ricavate con un grafico mettendo in ascissa il numero di giri effettuati (in scala logaritmica), mentre in ordinata il grado di addensamento (in % densità massima).

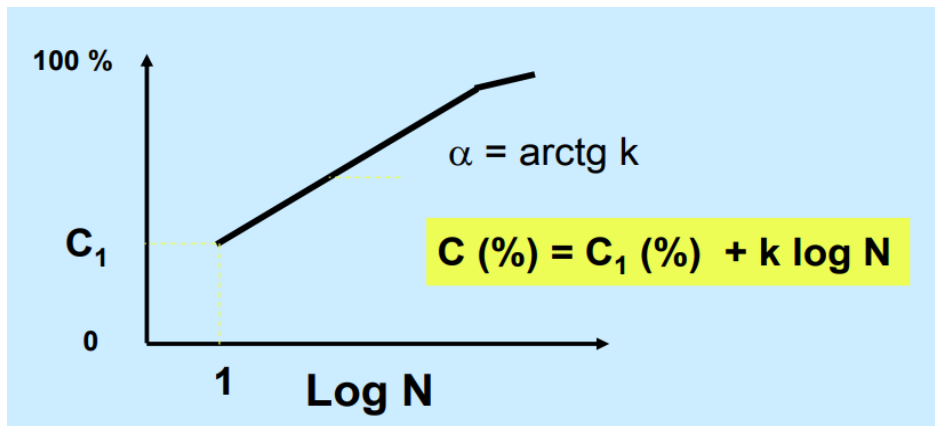


Figura 37: curva di compattazione

Svolgimento della prova: Prima di inserire il conglomerato caldo sciolto all'interno delle fustelle si mette un disco di carta dello stesso diametro nel fondo della fustella, per far sì che il provino non rimanga incollato al fondo della fustella. Poi dopo aver messo il conglomerato caldo viene messo di nuovo un disco di carta su scritto il nome del provino (Figura 38) necessario per l'identificazione durante la prova e infine si mette la piastra superiore che funge anche da pistone. Successivamente la fustella è pronta viene inserita all'interno della macchina (Figura 39), facendola ruotare fino a quando non raggiunge la sede di fermo. Sul pannello di controllo si immettono le caratteristiche di esecuzione della prova: nel nostro caso una pressione di 600 KPa, 100 mm di diametro della fustella e il numero di rotazione da effettuare di 100 giri. Si preme il pulsante "start" e il macchinario si avvia, il pistone scende imprime il carico indicato e comincia a ruotare. Raggiunti 100 giri il macchinario smette di ruotare, tira su il pistone e il provino è pronto per essere estratto dalla fustella. Per l'estrazione si mette la fustella in un estrattore rigido e tramite un martinetto idraulico si solleva il provino che esce dalla fustella sfilandosi dal basso verso l'alto (Figura 40). Il provino viene preso con cautela senza farlo rompere e lo si posa sul piano di lavoro del macchinario fino a quando non si raffredda completamente.



Figura 38: riempimento della fustella



Figura 39: fustella inserita all'interno della pressa giratoria



Figura 40: estrazione provino dalla fustella

2.4 ANALISI VOLUMETRICHE

Il comportamento dei conglomerati bituminosi è influenzato maggiormente dalla composizione volumetrica, per questo è importante affermare che le miscele sono composte da due fasi principali: una fase solida costituita da aggregati + legante e una fase gassosa costituita da aria.

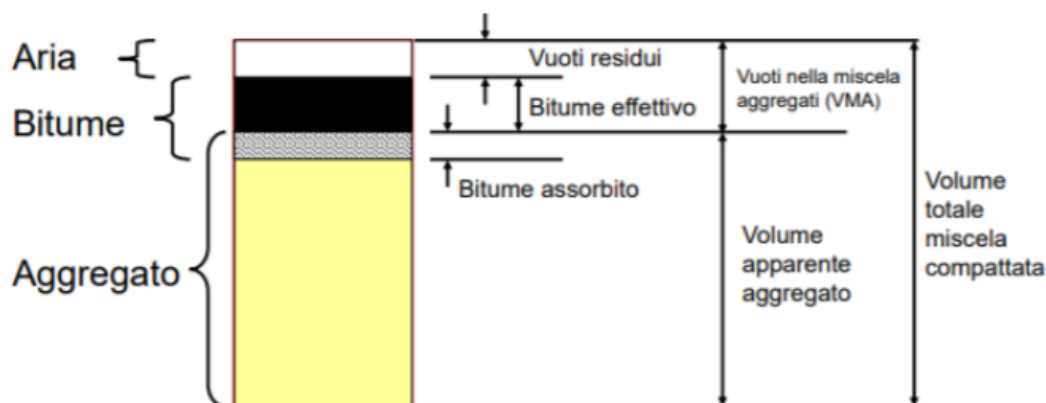


Figura 64: fasi che costituiscono il conglomerato bituminoso

Possiamo osservare dalla (Figura 64) che non tutto il bitume messo all'interno alla miscela vanno all'interno dei vuoti tra gli aggregati perché una parte di essa penetra nella porosità degli aggregati, dividendo così il bitume in "bitume assorbito" e "bitume effettivo". I vuoti del conglomerato bituminoso sono dati dal volume intergranulare occupato dall'aria. In questa sperimentazione sono stati impiegati i seguenti metodi per il calcolo delle proprietà volumetriche:

Determinazione della massa volumica massima

La massa volumica massima è la massa per unità di volume senza vuoti d'aria a una temperatura di prova nota. Nel presente elaborato la massa volumica massima ρ_m del conglomerato prodotto con la pressa a taglio giratoria è stata valutata utilizzando un procedimento matematico conformemente alla normativa UNI EN 12697-5, dove:

$$\rho_m = \frac{100}{\left(\frac{p_a}{\rho_a}\right) + \left(\frac{p_b}{\rho_b}\right)}$$

dove:

- ρ_m = massa volumica massima [kg/m³]
- p_a = percentuale di aggregati nella miscela [m/m]
- ρ_a = massa volumica apparente degli aggregati [kg/m³]
- p_b = percentuale di legante nella miscela [m/m]
- ρ_b = massa volumica del legante a 25°C [kg/m³]

Determinazione della massa volumica apparente (metodo geometrico)

La massa volumica apparente di un provino di conglomerato bituminoso compattato è la massa per unità di volume considerando i vuoti di aria ad una prefissata temperatura di prova. Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, la massa volumica apparente viene calcolata con il procedimento D dettata dalla norma europea UNI EN 12697-6. Tale procedura viene chiamata **metodo geometrico**

e prevede di misurare l'altezza del provino in millimetri tramite un calibro (Figura 49) e di determinare la massa del campione secco tramite una bilancia di precisione. Poi viene calcolata la massa volumica apparente con la seguente formula:

$$\rho_{b,geom} = \frac{m_1}{h \cdot d^2 \cdot \frac{\pi}{4}} \cdot 10^6$$

dove:

- $\rho_{b, geom}$ = massa volumica apparente del provino [Kg/m³]
- m_1 = massa del provino [g]
- h = altezza media del provino [mm]
- d = diametro del provino [mm]

Determinazione della massa volumica apparente (metodo sigillato)

La procedura C della norma europea UNI EN 12697-6, invece, prevede una prima misura della massa del campione secco (m_1); poi si misura la massa del provino sigillato con paraffina in acqua (m_2), ed infine, utilizzando un cestello per la pesata idrostatica, si misura la massa del provino paraffinato in acqua. In questo modo, nota la densità dell'acqua alla temperatura di prova, si determina la massa volumica "sea" ρ_{bsea} come segue:

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{(m_2 - m_3) / \rho_w - (m_2 - m_1) / \rho_{sm}}$$

dove:

- $\rho_{b,sea}$: massa volumica apparente del provino in kg/m³;
- m_1 : massa del provino asciutto in g;
- m_2 : massa del provino in acqua in g;
- m_3 : massa del provino + paraffina in acqua in g;
- ρ_w : massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova

Determinazione volume due vuoti

La determinazione delle proprietà volumetriche della miscela studiata, è stata basata sul contenuto dei vuoti residui dei provini compattati, in relazione a quanto prescritto nella norma UNI EN 12697-8. Avendo calcolato le due masse volumiche apparenti ($\rho_{b, geom}$ e ρ_{bsea}) per ciascun provino, sono state calcolate due tipologie di volume dei vuoti:

$$V_{m,geom} = \frac{\rho_m - \rho_{bgeom}}{\rho_m} \cdot 100$$

$$V_{m,sea} = \frac{\rho_m - \rho_{bsea}}{\rho_m} \cdot 100$$

2.5 PROVA DI MODULO A TRAZIONE INDIRECTA (ITSM)

Il test ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus) è una prova di laboratorio non distruttiva che si esegue su provini cilindrici di conglomerato bituminoso con spessore compreso tra 30 mm e 80 mm e diametro rispettivamente di 100 mm, 150 mm o 200 mm. La prova viene effettuata alla temperatura di 20°C, inserendo il provino in una apparecchiatura composta da una piastra di carico superiore e da una base d'appoggio inferiore, da un telaio orizzontale con quattro morsetti per il fissaggio del campione e due trasduttori elettrici (LVDT), posti diametralmente uno di fronte all'altro, per misurarne la deformazione diametrale orizzontale. Un sistema pneumatico collegato alla piastra superiore esercita sul provino per cinque cicli una forza verticale impulsiva che aumenta in modo graduale con il tempo. Si determina così il modulo di rigidezza a trazione indiretta.

Per eseguire questa prova si utilizza il Nottingham Asphalt Tester (NAT) che è un'apparecchiatura di laboratorio di nuova concezione che permette di calcolare alcune tra le più importanti caratteristiche meccaniche dei conglomerati bituminosi, come la resistenza a fatica, la resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti, il modulo complesso e come nel nostro caso il modulo di rigidezza a trazione indiretta. Il NAT è composto dai seguenti elementi:

- Cella climatica: per il monitoraggio della temperatura durante lo svolgimento dei test;
- Struttura di carico: è composta da due vitoni verticali, che consentono di regolare l'altezza dell'attuatore, fissati ad una piastra di base su cui si alloggia il castelletto di prova, avendo cura di centrarlo sotto la testa di carico. All'attuatore è poi collegata una cella di carico che invia all'unità di controllo i valori di forza registrati;
- Unità pneumatica: la forza che viene trasmessa al campione durante la prova, deriva dalla pressione idraulica prodotta da un compressore, il quale è collegato all'unità pneumatica del NAT. Durante le prove, tale pressione è mantenuta da questa unità tra i 6 e i 7 bar;
- Castelletto di prova: è il telaio di supporto e fissaggio del campione e dei trasduttori LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) aventi una precisione di 250 µm, necessari per misurare le deformazioni;
- Sistema computerizzato di acquisizione e controllo dei dati: è composta da sei moduli i quali forniscono energia elettrica agli organi di controllo e di misurazione. Questo sistema è in comunicazione diretta con il sistema di applicazione dei carichi ed i trasduttori.

Di seguito sono riportate alcune immagini che raffigurano gli elementi di cui è composto il NAT:

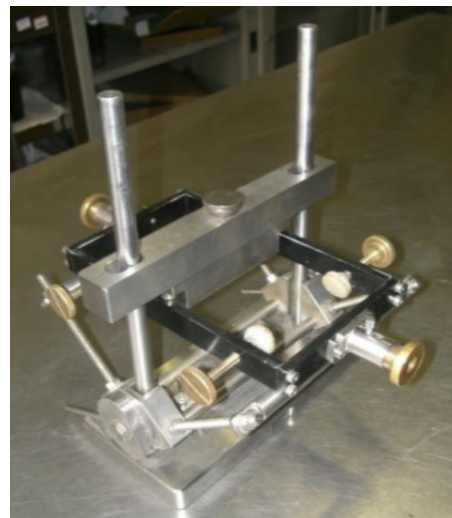
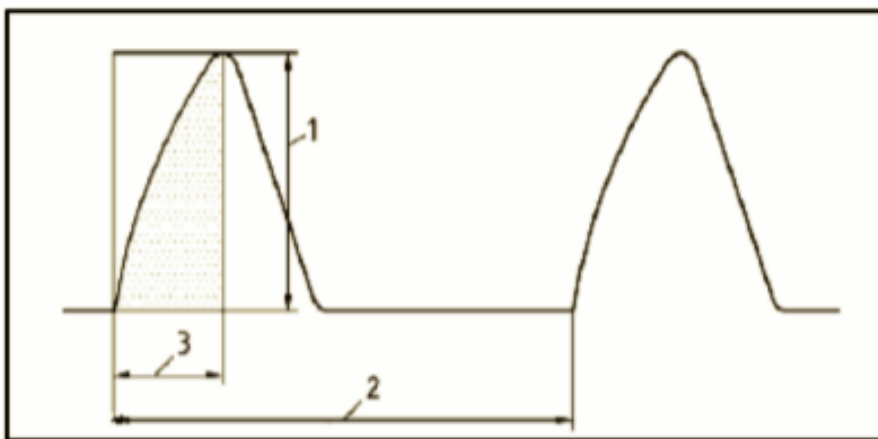


Figure 41,42: elementi che compongono il NAT



Figure 43,44: elementi che compongono il NAT

Come anticipato all'inizio del paragrafo, la prova di modulo di rigidezza è una tipologia di test non distruttivo che si esegue su campioni cilindrici e viene eseguita in configurazione di trazione indiretta. Il test è eseguito in accordo con la normativa UNI EN 12697-26 e sfrutta la teoria dell'elasticità per ottenere i valori di modulo di rigidezza in output, perciò il materiale viene assunto come omogeneo ed isotropo. Il provino cilindrico viene sottoposto ad una compressione verticale lungo due generatrici diametralmente opposte ed il tipo di carico che si adopera è pulsante, con un determinato periodo di riposo tra le ripetizioni.



Dove:

1: è il carico di picco

2: è la durata dell'impulso

3: è il rise-time, ovvero il tempo necessario ad arrivare al picco del carico, dal momento dell'applicazione dello stesso

Figura 45: schematizzazione dell'impulso di carico

Le deformazioni vengono lette sul diametro orizzontale che per effetto del carico tende ad allungarsi. Quindi nonostante venga applicata una compressione, la distribuzione delle tensioni nel piano verticale è di trazione. La figura seguente mostra le caratteristiche tensodeformative del campione durante l'esecuzione della prova:

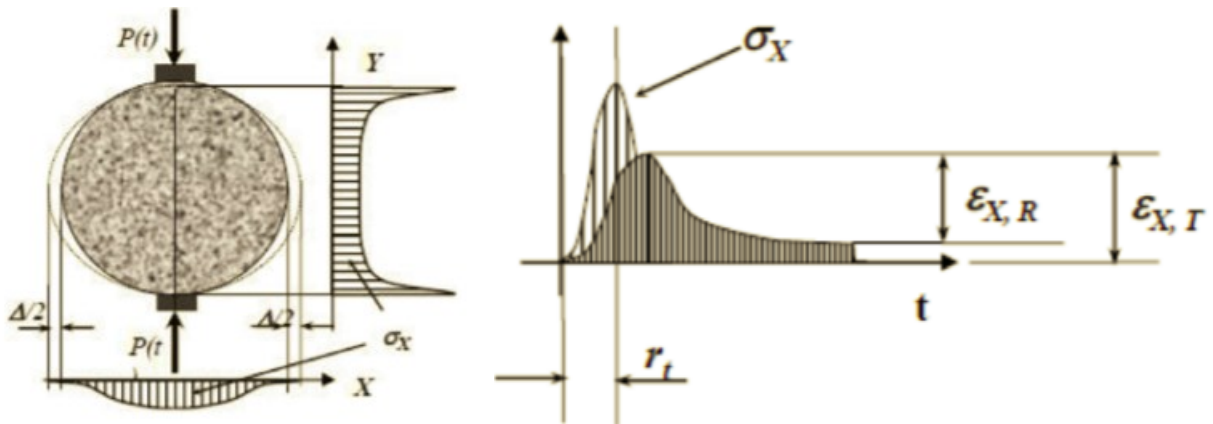


Figura 46,47: caratteristiche tensodeformative durante la prova

Come si può notare dalle immagini di destra, tra il valore di picco del carico e della risposta deformativa si ha un ritardo, il quale è legato alle proprietà viscoso del bitume. Il modulo di rigidezza è una grandezza meccanica definita quasi-elastica poiché il test, pur discendendo dalla misura di deformazioni non totalmente reversibili, è eseguito secondo delle condizioni che minimizzano l'influenza delle componenti viscoso. La temperatura di prova scelta è 20°C (pari a quella di condizionamento per la maturazione dei campioni dopo la compattazione).

Per la determinazione del modulo di trazione indiretta si parte tenendo presente in corrispondenza del diametro orizzontale, le sollecitazioni medie e massime nelle direzioni x (trazione) e y (compressione) sono calcolate dalle seguenti espressioni:

$$\sigma_{x,max} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \qquad \sigma_{x,media} = \frac{0,273 \cdot P}{d \cdot t}$$

$$\sigma_{y,max} = \frac{-6 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \qquad \sigma_{y,media} = \frac{-P}{d \cdot t}$$

Dove: **P** è il carico applicato, **d** è il diametro del campione e **t** è lo spessore del campione

La determinazione del modulo di rigidezza elastica, in funzione delle sollecitazioni teoriche, può essere rappresentata in termini di deformazioni di un elemento soggetto ad uno stato tensionale biassiale. La deformazione orizzontale ϵ_x dell'elemento è:

$$\epsilon_{x,media} = \frac{\sigma_{x,media}}{E} - \nu \frac{\sigma_{y,media}}{E}$$

Dove: **ν** è il coefficiente di Poisson ed **E** è il modulo elastico del materiale

Grazie alle espressioni ricavate, sostituite nella precedente formula e tenendo conto che la deformazione orizzontale dei campioni Δ si ottiene moltiplicando la deformazione media per il diametro del campione, si ha:

$$\Delta = \frac{0,273 \cdot P}{E \cdot t} + \nu \frac{P}{E \cdot t}$$

Da cui è possibile ricavare il modulo elastico del materiale **E**, definito come ITSM, come indicato nella seguente equazione:

$$ITSM = \frac{P}{\Delta \cdot t} \cdot (0,273 + v)$$

Il primo strumento che viene utilizzato all'interno del NAT può essere descritto grazie alla figura sottostante:

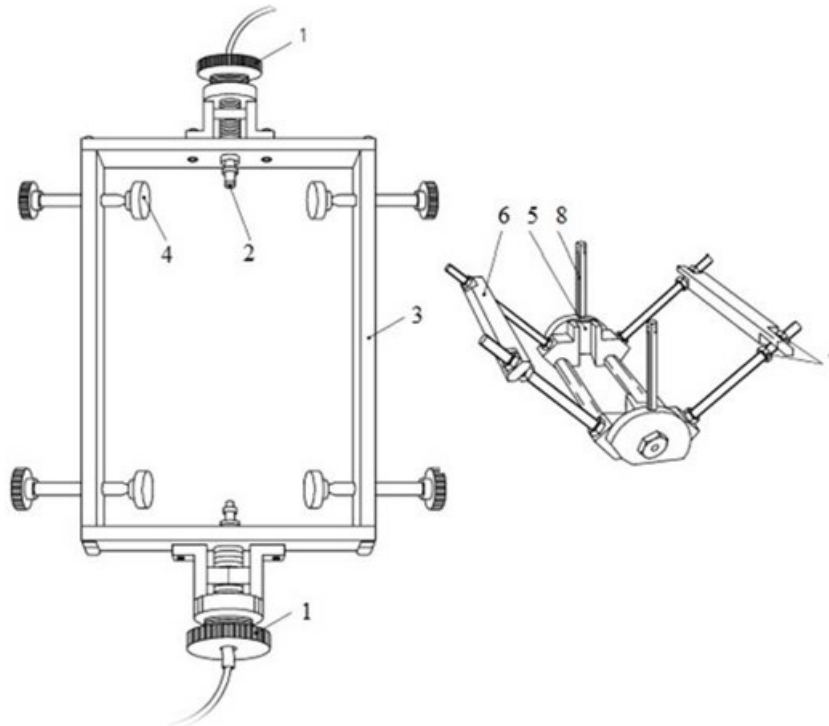


Figura 46: castelletto di prova

- 1- viti di bloccaggio dei trasduttori che li permette di assumere la posizione carretta;
- 2- trasduttori che devono entrare a contatto con la superficie del provino e misurare le deformazioni;
- 3- telaio utilizzato per posizionare il provino da testare, precedentemente condizionati termicamente a 20°C per un tempo sufficiente;
- 4- morsetti per disporre all'interno del telaio in modo centrato il provino e favorire il suo bloccaggio;
- 5- canale per consentire il corretto posizionamento del provino;
- 6- barre posizionate a un'un'altezza che è funzione del diametro del provino, permettendo di posizionare i trasduttori alla metà di esso;
- 7- viti che tengono in posizione tali barre;
- 8- leva che permette di abbassare il supporto al telaio che sostiene i trasduttori durante la fase di applicazione dei carichi

Successivamente posizionato il provino in modo corretto sul castelletto, il tutto viene inserito all'interno della cella climatica dove c'è la cella di carico:

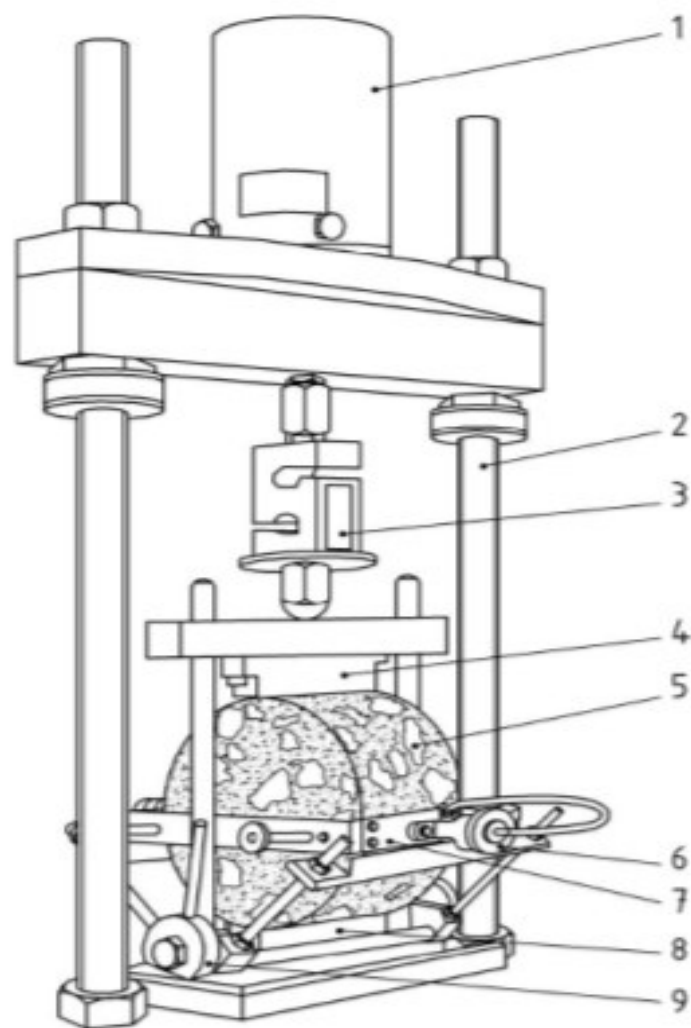


Figura 47: schema della prova ITSM completa

- 1- Attuatore di carico pneumatico
- 2- Montante d'acciaio
- 3- Cella di carico
- 4- Barra di carico superiore
- 5- Provino
- 6- Vite regolatrice trasduttore
- 7- Montante trasduttori
- 8- Barra di carico inferiore
- 9- Vite di allineamento trasduttori

Svolgimento della prova: la prima operazione da svolgere è mettere il provino all'interno del castelletto in maniera centrata rispetto al telaio rettangolare e alle barre di carico superiore e inferiore. Fatto ciò si mette il tutto all'interno della cella climatica dove viene mantenuta la temperatura di 20°C. Si chiude la porta della cella climatica ed il provino e si può iniziare la prima fase della prova.



Figura 48: cella di carico NAT con provino posizionato pronto per la prova

Poi si passa nel sistema computerizzato di acquisizione e controllo dati, dove si inseriscono tutti i dati del singolo provino:

- Diametro specifico: 100 mm
- Altezza specifica: calcolata tramite la media di 4 valori dell'altezza misurata in punti diversi

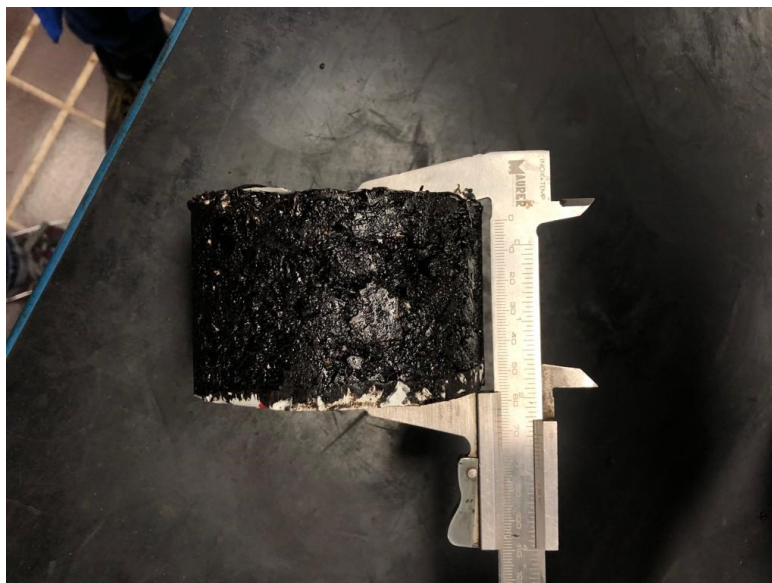


Figura 49: misura altezza provino

Oltre al diametro e l'altezza specifica nella pagina iniziale del software (Figura 50) devono essere messi altri parametri:

- Test temperature: temperatura alla quale viene effettuata la prova in °C, ovvero di 20°C
- Specimen diameter: diametro del provino
- Specimen thickness: altezza del provino
- Poisson's ratio: modulo di poisson, in questo caso viene assunto pari a 0.35
- Target rise-time: tempo che la macchina impiega ad applicare il carico di picco
- Target horizontal deformation: deformazione imposta sul provino
- Numero di colpi: numero di impulsi necessari

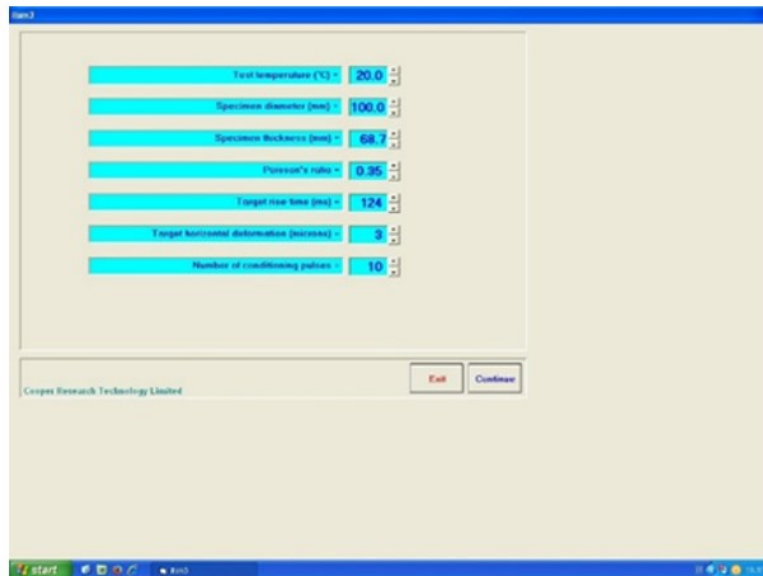


Figura 50: schermata iniziale software

Si passa dopodiché alla schermata della fase di contatto barra-pistone di carico (Figura 51): premendo il pulsante “make contact” il pistone si abbassa e si porta a contatto applicando una pressione di precarico pari a circa 30 KN.

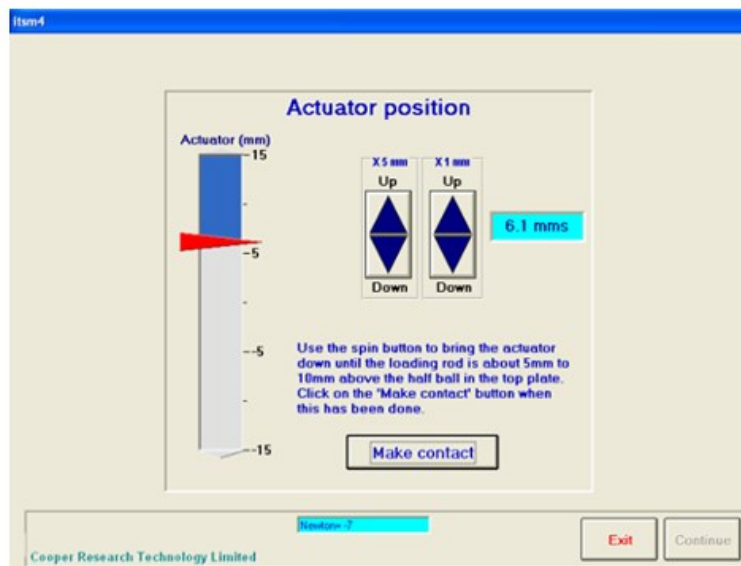


Figura 51: schermata del software con la funzione “make contact”

Adesso ci occupiamo del posizionamento dei trasduttori che vanno inseriti negli appositi fori e posti a contatto con il diametro orizzontale del provino. Per sapere se sono stati posizionati bene ricorriamo ad una finestra del software, che ci permette di vedere quando i trasduttori sono messi all'interno di un intervallo di validità, ovvero quando le frecce diventano di colore rosso (Figura 52).

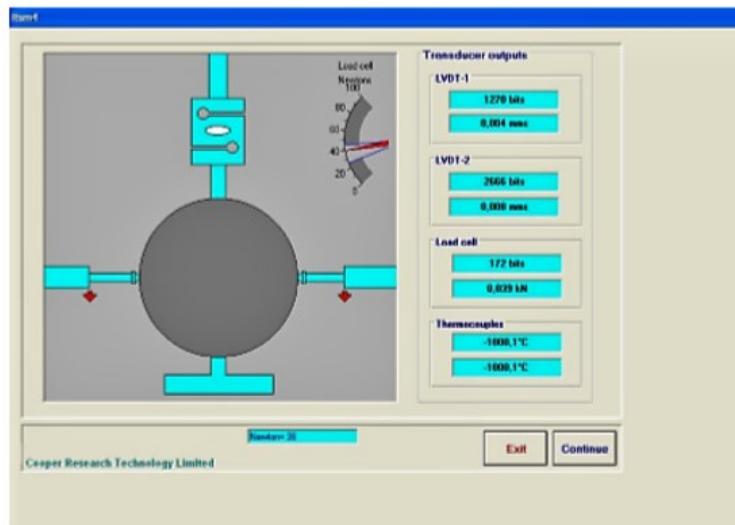


Figura 52: schermata posizionamento trasduttori

Una volta posizionati i trasduttori in modo corretto, si abbassano le barrette per non andare ad influenzare il risultato della prova e si procede alla fase di prearico dove vengono infissi 10 colpi di prearico che anticipano i 5 impulsi finali. Per ogni impulso, il software registra tutti i dati precedentemente descritti con i rispettivi valori medi, ottenendo così il modulo elastico a trazione indiretta del provino. (Figura 53).



Figura 53: schermata finale per il calcolo del modulo di rigidità medio ottenuto da 5 valori determinati

Per finire si preme il tasto “continue” per ripetere lo stesso procedimento sul medesimo provino ruotato di 90°. Nel caso in cui i moduli corrispondenti ai due diametri differiscano tra loro di una quantità maggiore del 20%, si rivela necessario effettuare una terza prova su un’ulteriore direzione diametrale, individuata nella bisettrice dei due precedenti diametri. I risultati ottenuti vengono successivamente mediati, ottenendo così un unico valore.

2.6 PROVA DI TRAZIONE INDIRETTA (ITS)

La prova ITS nota anche come prova Brasiliana, è la seconda caratterizzazione meccanica che è stata eseguita sui provini realizzati. È una prova distruttiva che si esegue sui provini in conglomerato bituminoso tramite l'applicazione di un carico di compressione trasmesso al provino da due teste di carico che avanzano ad una velocità costante di circa 50 mm/min. La rottura del materiale avviene per trazione in direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico (per questa viene chiamata trazione indiretta) per effetto Poisson. I provini prima di essere sottoposti alla prova di trazione indiretta devono essere messi in una camera climatica a 25°C per il condizionamento dei provini in quanto la temperatura è un fattore che influisce molto sul comportamento a rottura del materiale.

La macchina è composta da una struttura di base da cui si innalzano due colonne filettate a cui è fissato un traverso di contrasto mediante dei dadi. Al traverso di contrasto è poi collegata una cella di carico con la funzione di rilevare la forza applicata dal macchinario sui campioni. È inoltre presente un trasduttore lineare di spostamento che rileva in continuo il gap tra i due piatti di carico della pressa. La forza viene applicata al campione mediante un piatto di base che è collegato, attraverso un pistone, al motoriduttore che consente di applicare il carico secondo le direttive dell'operatore (nel caso in questione, la velocità di salita del piatto).



Figura 54: apparecchiatura per trazione indiretta

La resistenza a trazione indiretta è definita come il valore di tensione di trazione di picco calcolata in relazione alla sezione longitudinale del campione. L'apparato di prova è costituito da un castelletto dotato di due bande di carico metalliche dotate di una superficie concava con raggio di curvatura pari a quello del campione. Questo incavo consente di posizionare il campione stabilmente nel castelletto e distribuire uniformemente la pressione lungo la superficie di contatto con le bande di carico. Il castelletto, corredato di campione, viene poi inserito sulla piastra di base della pressa statica, pronto per iniziare il test. Il provino viene dunque caricato con forze verticali, che determinano per effetto Poisson una trazione (inclinata di 90° rispetto alla direzione della forza) sul piano diametrale verticale portando a rottura il campione per superamento della resistenza a trazione. La figura seguente mostra lo schema della configurazione di prova:

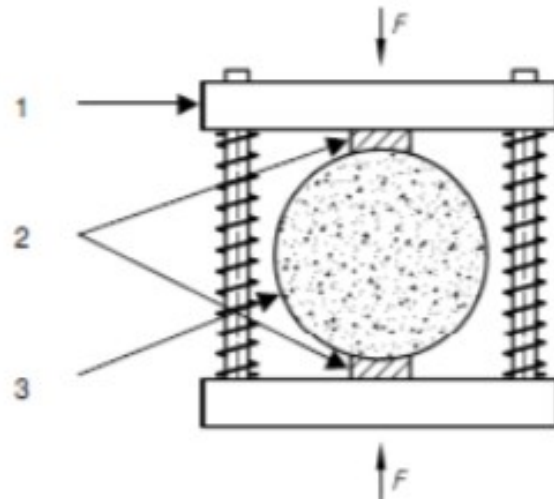


Figura 55: schema della prova ITS

Dove:

- 1- Testa di carico
- 2- Bande di carico
- 3- Campione

Come si può vedere dalla figura, delle molle di contrasto tengono separate le due ganasce (la ganascia superiore scorre in direzione verticale guidata da una coppia di aste poste ai lati del campione) per consentire l'alloggiamento del provino prima dell'inizio del test. Una volta fatta partire la prova, il macchinario registra automaticamente e in continuo ogni step di carico, ovvero le coppie di punti (forza applicata alla testa di carico; schiacciamento verticale subito del campione). È così possibile costruire delle curve di resistenza a trazione indiretta.

Svolgimento della prova: si prelevano i provini dalla camere climatica di condizionamento a temperatura di 25°C e si posiziona il provino sulla barra inferiore assicurandosi che sia posto in modo centrato ovvero controllare che il listello di carico superiore sia perfettamente allineato con quello inferiore.



Figura 56: provino posizionato correttamente nell'apparecchio

Si immettono i dati del provino richiesti dal software sulla schermata principale:

- Diametro del provino che nel nostro caso è 100 mm
- Altezza media calcolata mediante media aritmetica delle 4 altezze misurate
- Identificazione con il nome dato al provino per essere differenziato uno dall'altro

Infine è possibile avviare la prova dove il sistema di carico inferiore inizia ad avanzare verso l'alto con una velocità costante di 50 mm/min. L'apparecchio si arresta da solo quando viene registrata una riduzione di carico del 20%. Durante l'esecuzione della prova ci sono i due comparatori (che misurano sia la deformazione verticale che orizzontale subito dal provino in seguito all'applicazione del carico) che permettono di ricavare la curva sforzo-deformazione (Figura 56) dove possiamo individuare il carico di rottura.

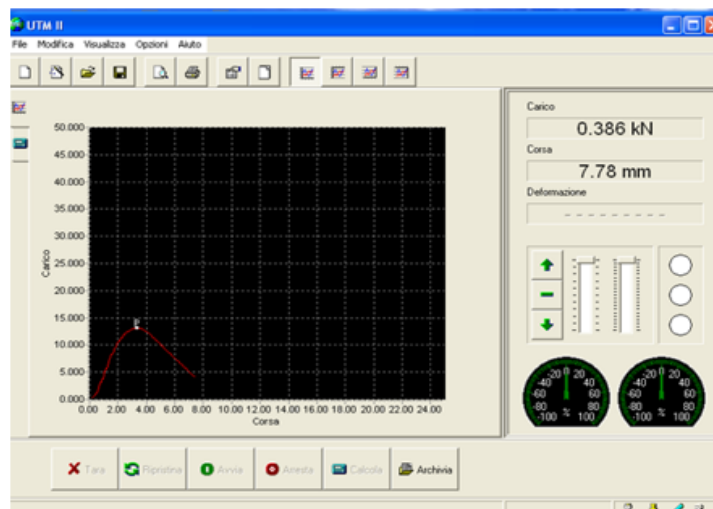


Figura 57: curva sforzo-deformazione

Il sistema tramite la curva sforzo-deformazione, ricava i parametri a noi interessati:

- 1- Carico di picco o di rottura (P)
- 2- Deformazione causata dalla rottura
- 3- Resistenza a trazione indiretta (ITS)

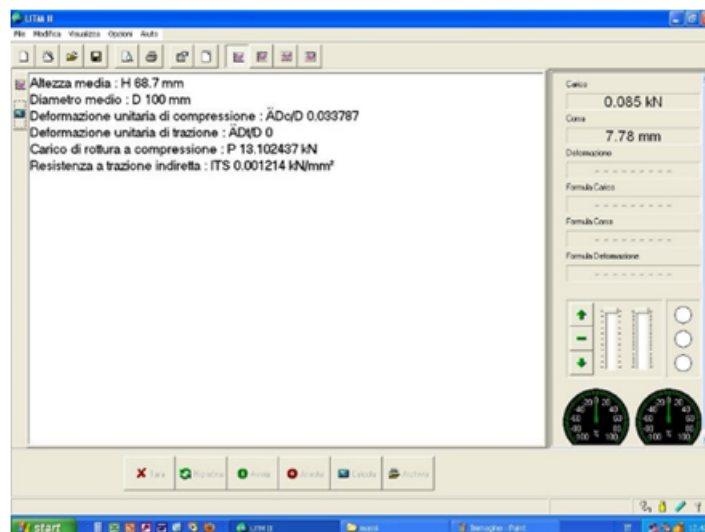


Figura 58: risultati software ITS

La resistenza a trazione indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), ovvero la massima trazione applicata indirettamente al provino, può essere calcolata tramite formula matematica noto il carico P , ed è pari a:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot d}$$

Dove:

- 1- P è il carico di picco
- 2- t è l'altezza media del provino
- 3- d è il diametro del provino

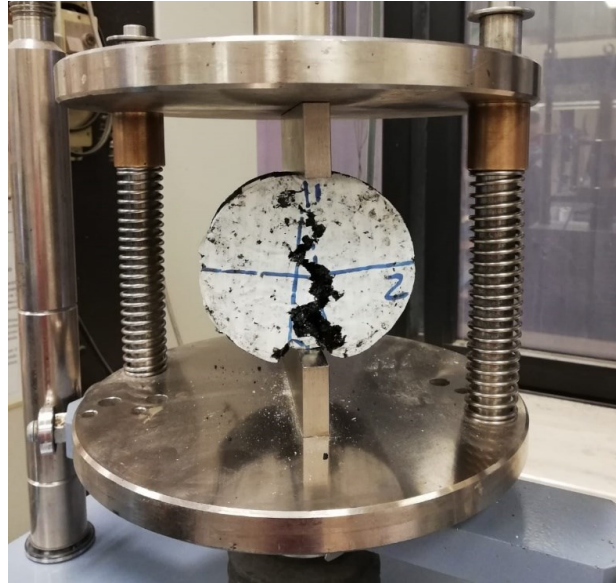


Figura 59: provino alla fine della fatica

2.7 PROVA DI FATICA (ITF)

La terza e ultima fase di caratterizzazione meccanica di questa sperimentazione, è stata mirata alla determinazione della resistenza a fatica del conglomerato bituminoso. Questo tipo di resistenza è molto importante per analizzare le caratteristiche del conglomerato bituminoso perché permette di simulare i carichi ciclici a cui sono sottoposte le pavimentazioni stradali per effetto dei carichi veicolari. La resistenza a fatica di un materiale è la capacità di sopportare carichi ciclici di intensità minore a quello di rottura ma che con una determinata frequenza e per un determinato periodo porta al collasso del materiale stesso. Essa è una prova distruttiva perché porta a completa rottura il provino per vedere dopo quanti cicli e con quale carico il provino si rompe.

L'apparecchiatura utilizzata è la NAT (ovvero quella utilizzata per trovare il modulo di resistenza a trazione indiretto descritto precedentemente), quindi la prova viene eseguita all'interno di una cella climatica dove la temperatura viene mantenuta costante a 20°C. I provini prima di essere sottoposti alla prova devono essere condizionati nella camera climatica a 20°C almeno per 8 ore, in modo che si raggiunga la temperatura a cui deve essere effettuata la prova.



Figura 60: esecuzione prova di fatica

Il provino in questa prova, a differenza della prova per la valutazione dell'ITSM, deve essere dotato di due barrette di metallo incollati, mediante acciaio liquido, in punti opposti lungo un diametro, i quali servono per l'installazione dei trasduttori necessari alla misurazione delle deformazioni. La prova ITF consiste nell'applicazione di un carico impulsivo di 0,1 secondi ad intervalli di 0,4 secondi. Si inizia con un determinato livello di carico e se la deformazione successiva ai primi 10 cicli non rientra nell'intervallo 100 a 400 $\mu\text{m}/\text{m}$, la prova deve essere interrotta ed il carico modificato. Generalmente vengono definiti tre livelli di carico ($\sigma=250/350/450$ tradotto come prova lenta, intermedia e veloce) per svolgere la prova e per ottenere un valore medio attendibile, per ogni livello di carico.

I parametri principali ottenibili dalla prova possono essere determinati come segue:

$$\sigma = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot \Omega}$$

$$\varepsilon = \left(\frac{2 \cdot \Delta H}{\Omega} \right) \cdot \left[\frac{1 + 3\nu}{(\pi \cdot \nu) + 4 - \pi} \right]$$

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{\Delta H}{\Omega}\right) \cdot 2,1$$

$$S = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\right) \cdot (1 + 3\nu)$$

Dove:

- σ = tensione sull'asse principale del provino [MPa]
- P = carico misurato [N]
- t = altezza del provino [mm]
- Ω = diametro del provino [mm]
- ε = deformazione orizzontale [$\mu\text{m}/\text{m}$]
- ΔH = deformazione orizzontale [mm]
- ν = coefficiente di Poisson (=0,35)
- S = modulo di rigidezza del materiale [MPa]

Svolgimento della prova: i provini prima di essere portati a rottura devono essere preparati, ovvero lungo i due diametri devono essere incollati due barrette di metallo che servono per posizionare i trasduttori che misurano le deformazioni. Finito questa operazione i provini vengono messi su un castelletto differente da quello utilizzato per la prova ITSM, messo all'interno dell'apparecchio NAT e tenuto fermo dalla barra di carico superiore che grava su di esso su cui il pistone andrà ad esercitare la forza.

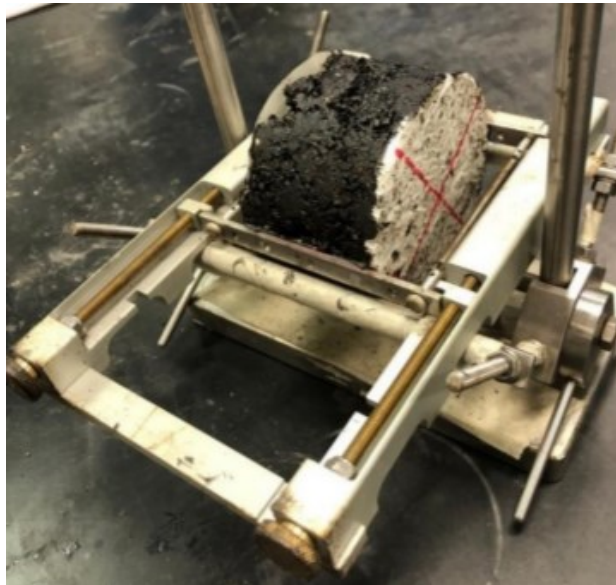


Figura 61: applicazione barrette metalliche sul provino messo sul castelletto apposito

Successivamente vengono posizionati i trasduttori grazie a delle viti che vengono inserite all'interno delle barrette metalliche e fissate grazie all'ausilio di bulloni. Montato i trasduttori si passa al sistema computerizzato tramite l'apertura del software dove nella prima schermata chiede di inserire le caratteristiche che condizionano la prova come:

- Temperatura: 20°C

- Diametro: 100 mm
- Altezza media: valore ottenuto dalla media di 4 altezze calcolate
- Tensione da applicare: varia in base alla prova, lenta, intermedia o veloce.

Inseriti i dati richiesti, il software richiede il corretto posizionamento dei trasduttori, (come nella prova ITSM per trovare il modulo, anche se ha una conformazione diversa) devono essere regolati attraverso le due viti messe precedentemente sulle barrette metalliche. Bisogna avvitarle o svitarle fino a quando non viene raggiunta una condizione di stazionamento, ovvero guardando la figura 63 quando le due lancette sono comprese tra le due zone rosse.

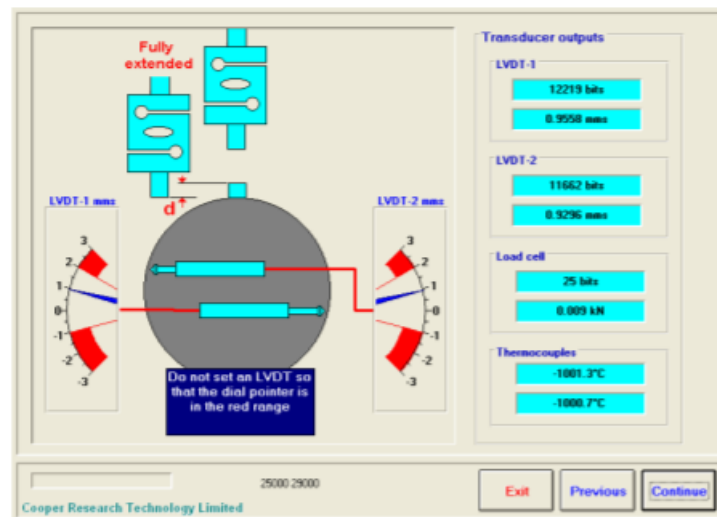


Figura 62: schermata per il posizionamento dei trasduttori

Posizionati i trasduttori nel modo corretto si preme il tasto “start” il pistone scende e va a contatto con la barra di carico e una volta stabilizzata inizia a dare gli impulsi. La prova si arresta automaticamente quando il provino si rompe oppure quando sono stati superati il numero di impulsi massimi dichiarati dalla normativa.

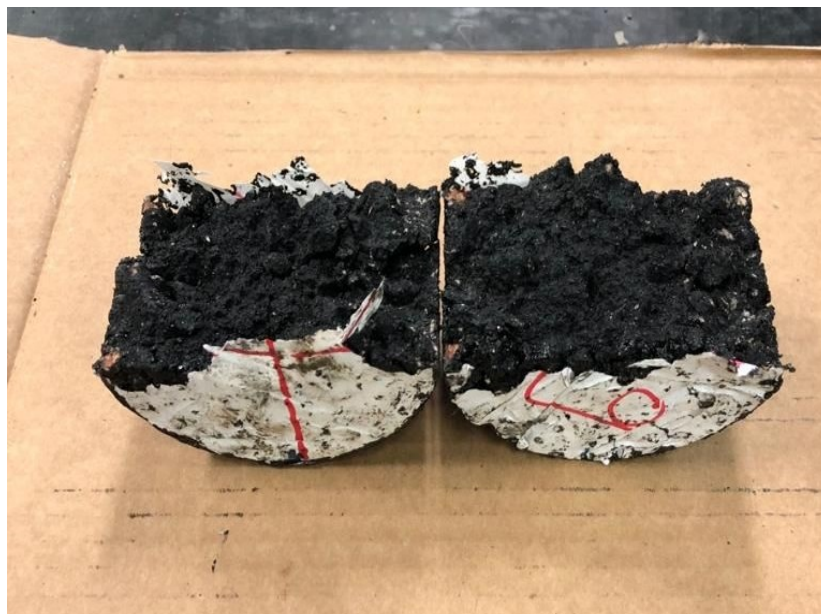


Figura 63: provino rotto dopo la prova

CAPITOLO 3: Risultati

3.1 RISULTATI CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE

Considerando le formule trattate nel capitolo 2.5 per determinare il volume apparente tramite il metodo geometrico e il metodo dry e infine il volume dei vuoti, è possibile analizzare le caratteristiche volumetriche dei due tipi di provini sperimentati:

PROVINI A: realizzati partendo dalla sfuso portato in laboratorio all'interno di sacchi di carta

massa volumica massima

Sono stati considerati i seguenti parametri fissi uguali per tutti i provini:

D [mm]	100
%bitume	5,5%
%aggregati	94,5%
pb [g/cm3]	1,01
ρA [g/cm3]	2,66
ρmmax [g/cm3]	2,441
ρw [g/cm3]	0,9983

$$\rho_m = \frac{100}{\left(\frac{P_a}{\rho_a}\right) + \left(\frac{P_b}{\rho_b}\right)}$$

massa volumica apparente e volume dei vuoti (metodo geometrico)

N° provino	hm [mm]	m1 [g]	pb,geom [g/cm3]	Vm,geom [%]
A1	63,2	1090,6	2,199	9,9
A2	64,7	1122,6	2,210	9,5
A3	63,9	1101,7	2,194	10,1
A4	64,1	1095,7	2,178	10,8
A5	64,4	1099,9	2,176	10,8
A6	65,7	1121,1	2,173	11,0
A7	64,5	1110,6	2,194	10,1
A8	65,5	1120,8	2,180	10,7
A9	64,4	1099,4	2,174	10,9
A10	65,3	1116,9	2,179	10,7
A11	64,9	1112,8	2,184	10,5
A12	64,8	1108,4	2,179	10,7
A13	66,3	1131,2	2,173	11,0
A14	65,6	1124,8	2,182	10,6
A15	64,1	1101,4	2,186	10,4

$$\rho_{b,geom} = \frac{m1}{h \cdot d^2 \cdot \frac{\pi}{4}} \cdot 10^6$$

$$V_{m,geom} = \frac{\rho_m - \rho_{b,geom}}{\rho_m} \cdot 100$$

massa volumica apparente (metodo sigillato)

N° provino	$\rho_{b,geo}$ [g/cm ³]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm ³]	V _{m,sea} [%]
A1	2,199	2,263	7,3
A2	2,210	2,274	6,8
A3	2,194	2,258	7,5
A4	2,178	2,241	8,2
A5	2,176	2,240	8,2
A6	2,173	2,236	8,4
A7	2,194	2,258	7,5
A8	2,180	2,243	8,1
A9	2,174	2,237	8,4
A10	2,179	2,243	8,1
A11	2,184	2,248	7,9
A12	2,179	2,243	8,1
A13	2,173	2,236	8,4
A14	2,182	2,249	7,9
A15	2,186	2,247	7,9

Per determinare $\rho_{b,sea}$ non viene utilizzata la formula

$$\rho_{b, sea} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \cdot \rho_w$$

perché non abbiamo a disposizione tutte le masse dei provini sigillati con la paraffina determinate mediante pesata idrostatica. Sono state calcolate solo le masse di 2 provini sigillati e quindi per determinare $\rho_{b,dry}$ di tutti gli altri 13 provini è stata effettuata una semplice proporzione:

$$\rho_{b, geo}: \frac{\rho_{b, geo}(14) + \rho_{b, geo}(15)}{2} = \rho_{b, sea}: \frac{\rho_{b, sea}(14) + \rho_{b, sea}(15)}{2}$$

dove: $\rho_{b, sea}$

$$\rho_{b, sea} = \frac{\frac{\rho_{b, sea}(14) + \rho_{b, sea}(15)}{2}}{\frac{\rho_{b, geo}(14) + \rho_{b, geo}(15)}{2}}$$

Mentre per trovare il V_{m,sea} utilizziamo la formula descritta in precedenza:

$$V_{m, sea} = \frac{\rho_m - \rho_{b, sea}}{\rho_m} \cdot 100$$

PROVINI IN SITO: realizzati direttamente in cantiere

massa volumica massima

Sono stati considerati i seguenti parametri fissi uguali per tutti i provini:

D [mm]	100
%bitume	5,5%
%aggregati	94,5%
ρ_b [g/cm³]	1,01
ρ_A [g/cm³]	2,66
ρ_{mmax} [g/cm³]	2,441
ρ_w [g/cm³]	0,9983

massa volumica apparente e volume dei vuoti (metodo geometrico)

N° provino	hm [mm]	m1 [g]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm³]	Vm,geom [%]
5A	61,9	1059,2	2,180	10,7
5B	61,8	1037,3	2,137	12,5
5C	61,8	1041	2,146	12,1
5D	61,2	1041,8	2,168	11,2
6A	63,4	1063,6	2,135	12,5
6B	61,9	1051,3	2,162	11,4
6C	63,0	1057,3	2,136	12,5
6D	62,6	1041	2,116	13,3

massa volumica apparente (metodo sigillato)

N° provino	hm [mm]	m1 [g]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm³]	Vm,sea [%]
5A	61,9	1059,2	2,28	6,6
5B	61,8	1037,3	2,24	8,2
5C	61,8	1041	2,25	7,8
5D	61,2	1041,8	2,27	7
6A	63,4	1063,6	2,23	8,6
6B	61,9	1051,3	2,26	7,4
6C	63,0	1057,3	2,23	8,6
6D	62,6	1041	2,21	9,5

3.2 CONFRONTO DELLE ANALISI VOLUMETRICHE

Dai dati dei volumi dei vuoti possiamo ricavare i seguenti grafici:

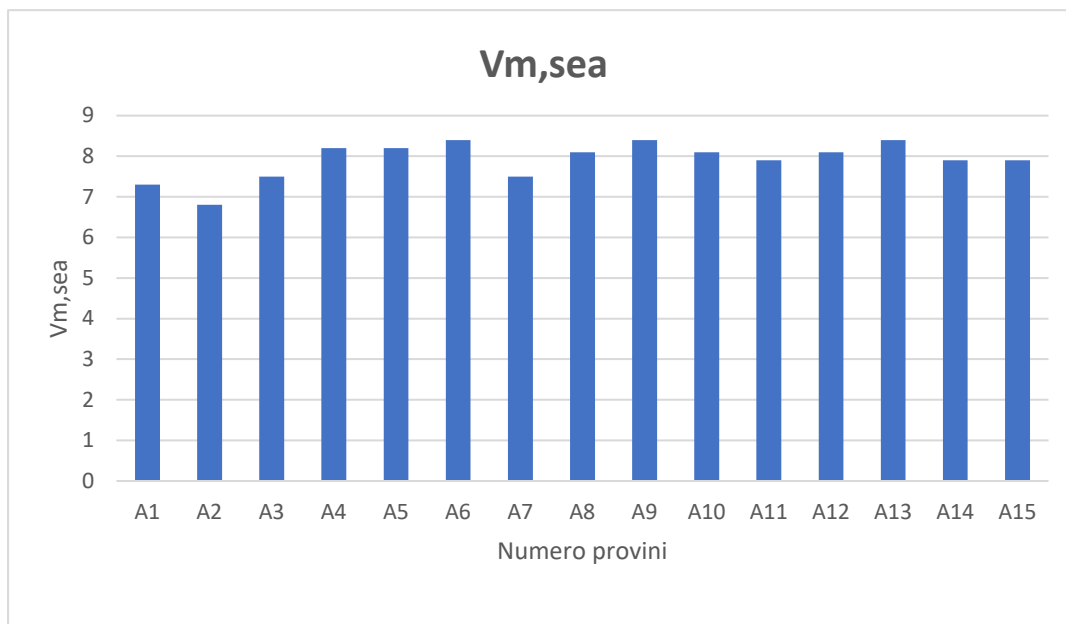


Figura 64: valori dei vuoti relativi ai provini A

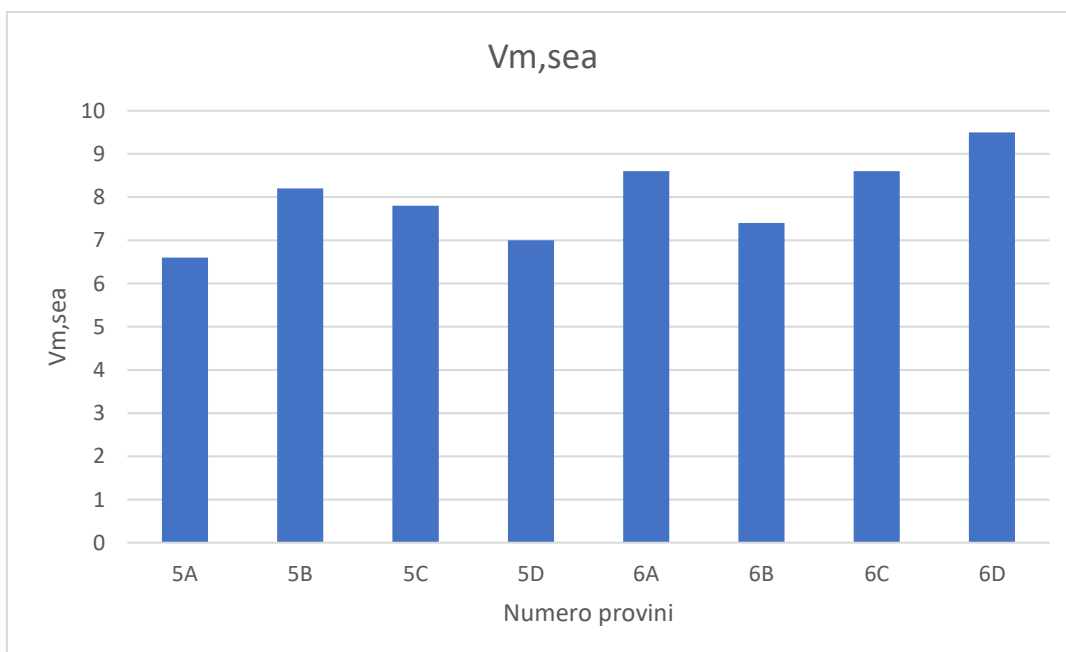


Figura 65: valori dei vuoti relativi ai provini in sito

Guardando i grafici si osserva che i provini realizzati in sito hanno una quantità maggiori di vuoti rispetto ai provini A che sono stati compattati in laboratorio con la pressa a taglio giratoria. Quindi si evince che i provini in sito non sono stati compattati a livello ottimale. Occorre precisare che, anche quelli compattati in laboratorio non rispettano le prescrizioni del capitolato ANAS (3 – 6 %).

3.3 PROVA DI MODULO E DI ROTTURA A TRAZIONE INDIRETTA

Per il test ITSM che determina il modulo a trazione indiretta la prova è stata eseguita su 13 provini compattati in laboratorio e su tutti i provini preparati in sito. I risultati sono stati ricavati prendendo in considerazione le formule spiegate nel capitolo 2.4. e sono i seguenti:

PROVINI A

N° provino	ITSM1 [MPa]	ITSM1 [MPa]	ITSMm [MPa]
A1	5850	5807	5828,5
A2	5993	6077	6035
A3	5779	5688	5733,5
A4	5597	5656	5626,5
A5	5689	5594	5641,5
A6	5621	5175	5398
A7	5886	5532	5709
A8	5386	5225	5305,5
A9	5473	5346	5409,5
A10	5651	5346	5498,5
A11	5460	5427	5443,5
A12	5273	5186	5229,5
A13	5582	5626	5604

Valore medio ITSMm: 5574

PROVINI IN SITO

N° provino	ITSM1 [MPa]	ITSM1 [MPa]	ITSMm [MPa]
5A	6694	6669	6681,5
5B	6752	6458	6605
5C	6803	6879	6841
5D	6953	6895	6924
6A	2994	3152	3073
6B	2528	2419	2473,5
6C	4376	3902	4139
6D	3968	3656	3812

Valore medio ITSMm: 5069

3.4 CONFRONTO DEI RISULTATI DEI MODULI A TRAZIONE INIDRETTA (ITSMm)

Dai valori dei moduli a trazione indiretta possiamo ricavare i seguenti grafici:

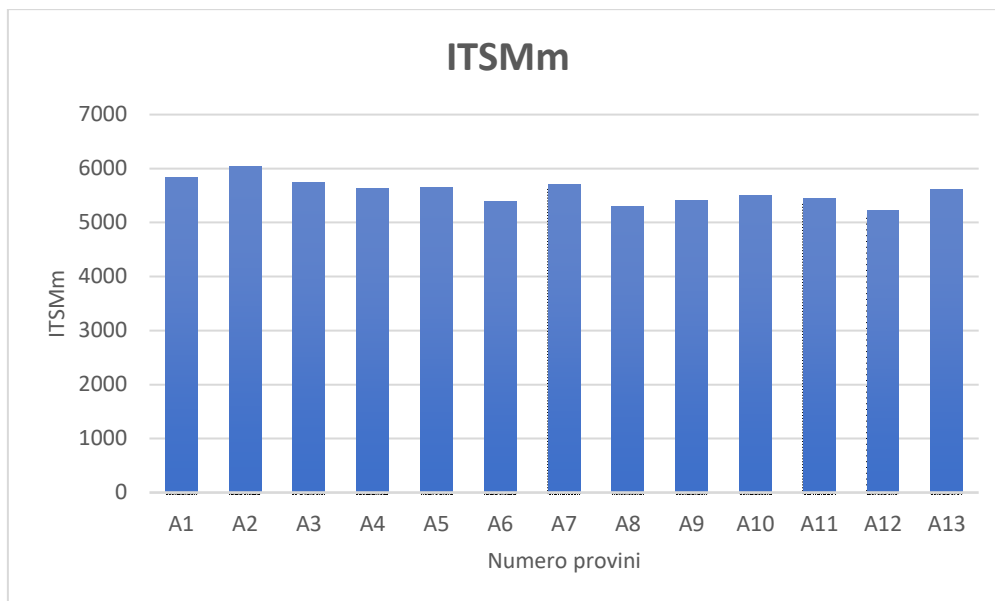


Figura 66: moduli a trazione indiretta provini A

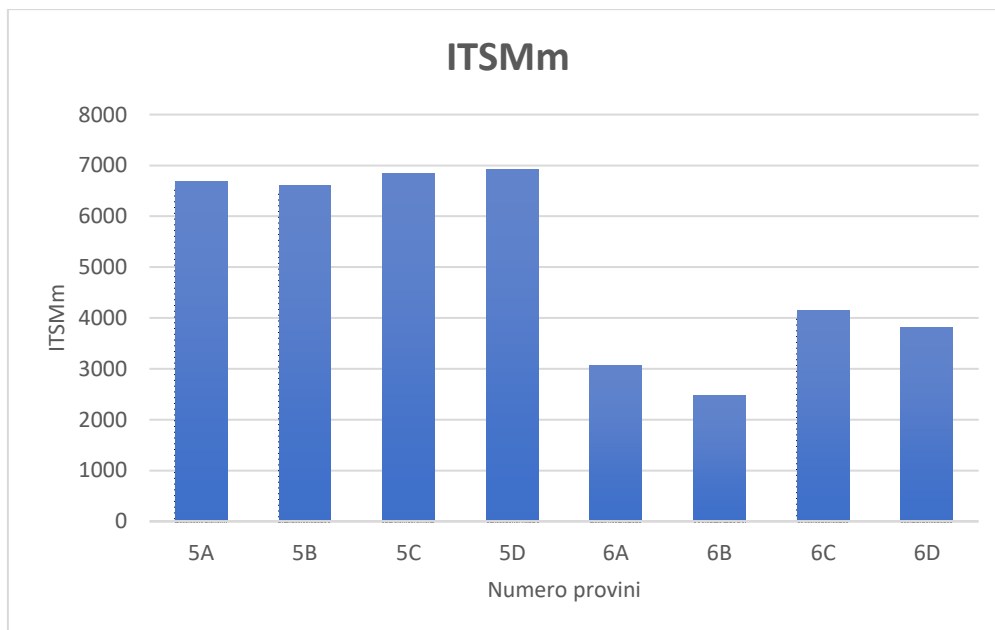


Figura 67: moduli a trazione indiretta provini in sito

Si può notare dalle precedenti tabelle come la seconda famiglia di provino in sito (contrassegnata dal numero 6), abbia ottenuto moduli di molto inferiori sia alla famiglia 5 che ai provini compattati in laboratorio. Questo è probabilmente dovuto ad una insufficiente temperatura di compattazione quando questi provini sono stati confezionati.

3.5 CONFRONTO DEI RISULTATI DELLA ROTTURA A TRAZIONE INDIRETTA (ITS)

Invece per quanto riguarda la prova di rottura a trazione indiretta (ITS), sono stati sottoposti a tale prova solo 3 provino di quelli compattati in laboratorio, mentre per i provini realizzati in sito sono stati portati a rottura 6 provini. I risultati delle prove sono stati ricavati con il procedimento spiegato nel capitolo 2.5 e sono i seguenti:

PROVINI A

N° provino	P [kN]	dc/d	ITS [MPa]
A1	12,09	0,024578	1,219
A2	11,89	0,027722	1,17
A3	11,12	0,024408	1,11

Valore medio ITS: 1,17

PROVINI IN SITO

N° provino	P [kN]	dc/d	ITS [MPa]
5A	18,72	0,02434	1,93
5B	18,62	0,036013	1,92
5C	18,53	0,023769	1,91
6A	12,85	0,047134	1,29
6B	11,16	0,03989	1,15
6C	15,92	0,034513	1,6

Valore medio ITS: 1,63

Dai valori delle resistenze a trazione indiretta vengono ricavati i seguenti grafici:

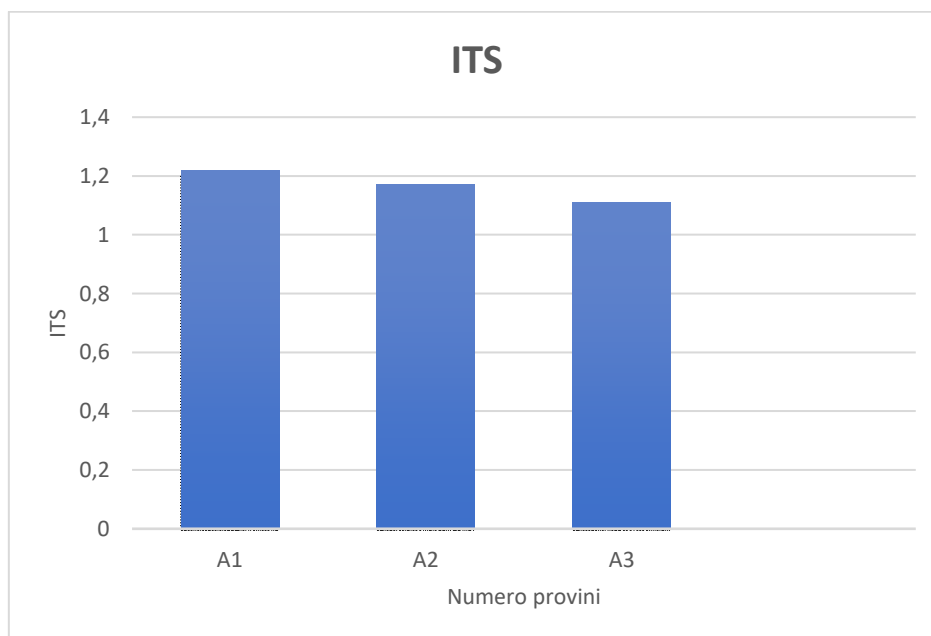


Figura 68: moduli di resistenza a trazione indiretta provini A

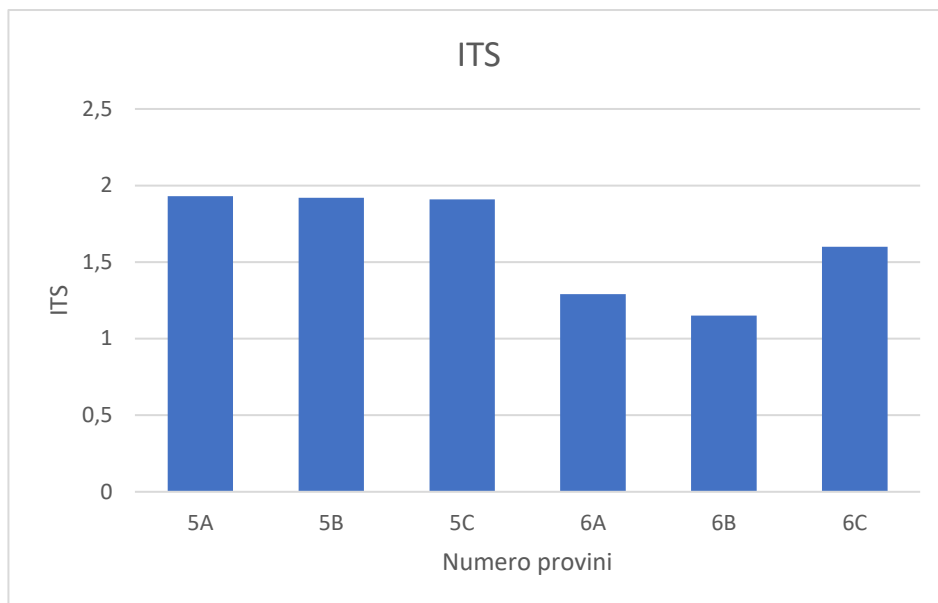


Figura 69: moduli di resistenza a trazione indiretta provini in sito

Guardando le figure 69-70 è possibile notare che anche se i provini in sito hanno un modulo minore rispetto a quelli fatti in laboratorio hanno una resistenza a trazione indiretta maggiore, oltrepassando il limite superiore fornito dal capitolato ANAS.

3.6 **RISULTATI PROVA DI FATICA (ITF)**

La prova di fatica è stata realizzata solo su 9 provini compattati in laboratorio, i risultati ottenuti sono stati calcolati mediante le formule spiegate nel capitolo 2.6 e sono i seguenti:

N° provino	σ [kPa]	ϵ_{110}	ϵ_0	N° cicli
A4	500	392	183,1338	13400
A5	550	394	198,1895	9580
A6	400	226	145,8815	98000
A7	400	232	139,3136	93500
A8	300	186	114,1849	258000
A9	400	264	149,8264	76000
A10	300	176	108,8303	382500
A11	325	182	122,0238	405536
A13	550	410	201,9885	8500

Figura 70: risultati prova di fatica su provini di ASPHALT RUBBER testato nella sperimentazione

Per un conglomerato bituminoso modificato hard e per conglomerati bituminosi tradizionali possiamo considerare questi dati fatta su un'altra sperimentazione come risultato della prova di fatica:

N° provino	σ [kPa]	ϵ_{110}	ϵ_0	N° cicli
B1	275	255	132,90	157586
B2	250	205	108,24	309186
B3	250	171	99,53	736500
B4	350	276	135,17	79706
B5	450	351	142,47	33556
B6	350	246	125,22	92686
B7	450	337	139,31	37260
B8	500	391	172,95	9500

Figura 71: risultati prova di fatica su provini di conglomerato bituminoso modificato hard

N° provino	σ [kPa]	ϵ_i	N° cicli
C1	500	158	22436
C2	600	188	8636
C3	700	192	4906
C4	700	208	3566
C5	500	150	22526
C6	600	188	10286
C7	600	187	10686
C8	500	142	55076
C9	700	228	2750

Figura 72: risultati prova di fatica su provini di conglomerato bituminoso tradizionale

3.7 CONFRONTO DEI RISULTATI DELLE PROVE DI FATICA

Confrontando su dei grafici i valori ottenuti dalle prove di fatica osserviamo:

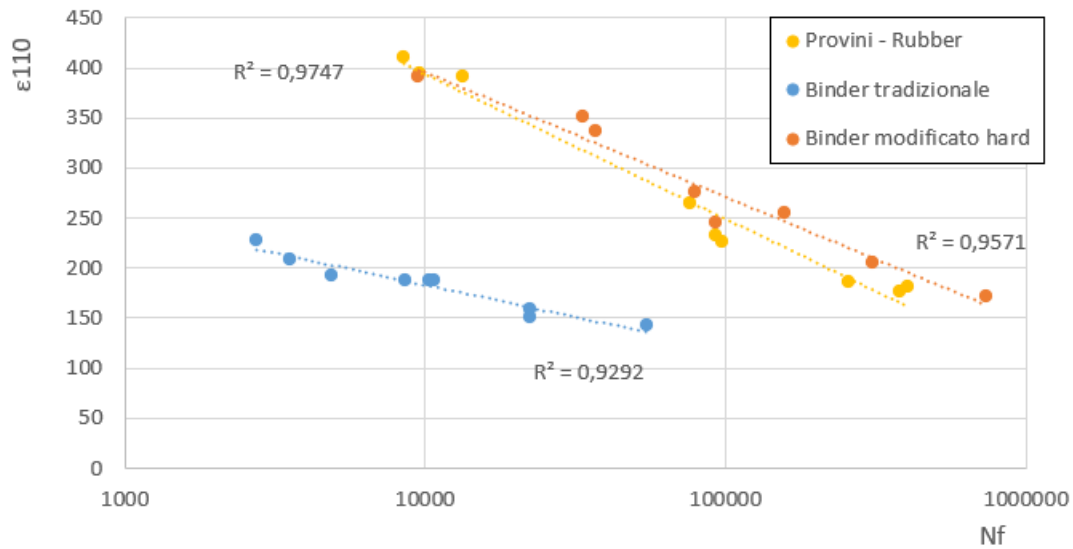


Figura 73: confronto con le altre miscele della deformazione in base ai numeri di cicli

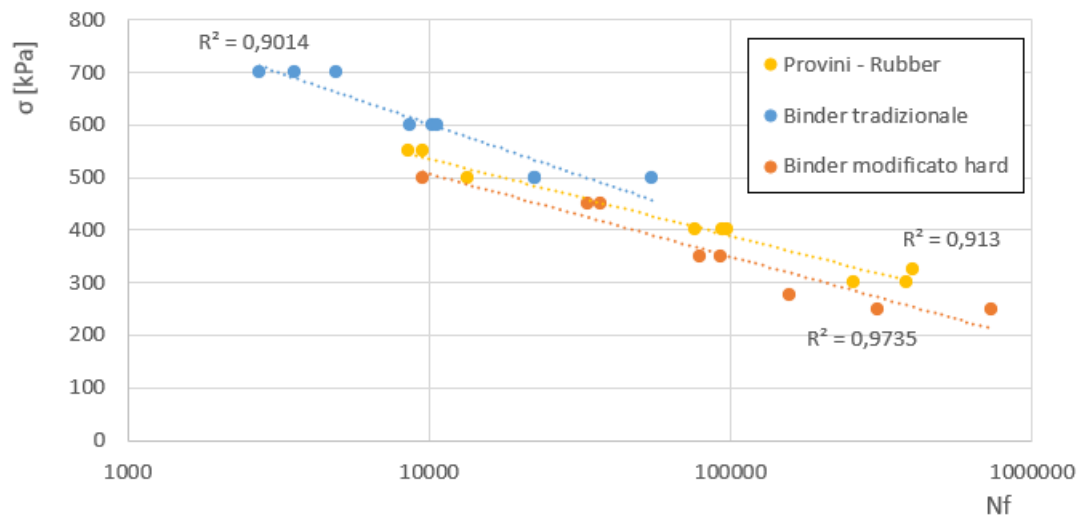


Figura 74: confronto con le altre miscele delle tensioni in base ai numeri di cicli

Dai grafici 73 e 74 possiamo notare che a livello di tensioni e deformazioni quando si sottopone il materiale a carichi, il conglomerato bituminoso Asphalt Rubber si trova ad un livello intermedio tra un conglomerato bituminoso tradizionale dove le prestazioni sono buone e un conglomerato bituminoso modifica Hard dove le prestazioni sono eccellenti.

CONCLUSIONI

La seguente sperimentazione condotta presso il Laboratorio del Dipartimento di “Ingegneria Civile, Edile ed Architettura” sezione Strade dell’Università Politecnica delle Marche, è stata svolta con l’obiettivo di valutare il comportamento di conglomerati bituminosi con polverino dei pneumatici fuori uso (PFU). Il seguente studio viene svolto per valutare e confrontare le prestazioni dell’asphalt rubber rispetto ai conglomerati con bitume tradizionale e conglomerati con bitume modificato hard. Con lo scopo di trovare materiali innovativi con migliori prestazioni e ridurre l’impatto ambientale causate dalle discariche dove tonnellate di pneumatici fuori uso vengono stoccati prima di essere smaltiti.

Sono state testate le prestazioni di due tipologie di provini, una compattata in laboratorio mediante pressa a taglio giratoria, mentre l’altra sono stati confezionati in sito durante la stesa del manto stradale. Dai dati raccolti al termine della sperimentazione è stato possibile comprendere il comportamento dei conglomerati contenenti polverino in gomma rispetto alle altre tipologie di conglomerati. Dall’analisi dei risultati della sperimentazione si è arrivati alle seguenti considerazioni:

- Dall’analisi volumetrica: guardando i grafici si osserva che i provini in sito hanno una maggiore quantità di vuoti rispetto ai provini A che sono stati compattati in laboratorio con la stessa miscela con la pressa a taglio giratoria. Questo dimostra che la compattazione in sito dei provini non è avvenuta a livello ottimale. Inoltre quelli compattati in laboratorio non rispettano i requisiti prescritti dal capitolato ANAS, che afferma che i vuoti devono essere contenuti dal 3% ad un massimo del 6%.
- Dalla prova per trovare il modulo a trazione indiretta: è possibile notare che i provini A compattati in laboratorio con la pressa a taglio giratoria presenta un modulo di resistenza maggiore rispetto ai provini realizzati in sito. Questo coincide con l’analisi volumetrica che perché i provini che presentano più vuoti, nel nostro caso quelli realizzati in sito hanno un modulo di resistenza indiretta minore.
- Dalla prova di rottura a trazione diretta: invece si può osservare un comportamento quasi contraddittorio perché è possibile notare che anche se i provini realizzati in sito hanno un modulo di resistenza a trazione indiretta minore presentano carichi di rottura maggiori rispetto a quelli compattati in laboratorio che in precedenza era stato dimostrato di avere un modulo di resistenza più elevato.
- Dalla prova a fatica ITF: mettendo in relazione le tensioni e le deformazioni con il numero di cicli è possibile vedere quali sono le prestazioni dei conglomerati bituminosi con polverino in gomma che risultano essere in uno stadio intermedio tra il comportamento eccellente dei conglomerati bituminosi con bitume modificato hard e con quello buono dei conglomerati con bitumi tradizionali.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

https://moodle2.units.it/pluginfile.php/245358/mod_resource/content/1/MATERIALI_PAV_18Cap_4_5_6_7_8.pdf

http://www.comune.torino.it/trasporti/bm~doc/5_quaderno-urb-pavimentazioni.pdf

<https://www.infobuild.it/approfondimenti/pavimentazioni-stradali-caratteristiche-e-struttura/>

<https://www.aup.it/wp-content/uploads/2013/02/6-pavimentazioni-e-materiali.pdf>

https://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/1.3.3/Quaderni_tecnici_volume_5.PDF

http://amsdottorato.unibo.it/5635/1/Petretto_Francesco_Tesi.pdf

Tesi Antunes_revisione 19.02.06 (5).pdf

<https://geoconsultingitalia.com/prensa-a-taglio-giratoria/>

Felice A. Santagata, "Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali", Pearson. Vol. 1 e 2;