



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

---

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE**  
**DICEA – DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA**

**CARATTERIZZAZIONE DELL'ADESIONE TRA**  
**AGGREGATI E LEGANTI INNOVATIVI**  
**ECOSOSTENIBILI**

*CHARACTERIZATION OF THE ADHESION BETWEEN*  
*INNOVATIVE ECO-SUSTAINABLE AGGREGATES*  
*AND BINDERS*

*Relatore:*  
**Prof. Ing. Francesco Canestrari**

*Tesista:*  
**Daniele Corradini**

*Correlatore:*  
**Prof. Ing. Fabrizio Cardone**

Anno Accademico 2020-2021

# Sommario

<b>1</b>	<b>SOSTENIBILITA' AMBIENTALE ED ECONOMIA CIRCOLARE .....</b>	<b>5</b>
1.1	SOSTENIBILITA' AMBIENTALE .....	5
1.2	EVOLUZIONE DEL QUADRO NORMATIVO .....	8
1.3	L'ECONOMIA CIRCOLARE .....	12
1.3.1	<i>I principi dell'economia circolare .....</i>	<i>14</i>
1.3.2	<i>I vantaggi dell'economia circolare.....</i>	<i>15</i>
1.4	IL CONCETTO DI SOSTENIBILITA' AMBIENTALE APPLICATO ALLE PAVIMENTAZIONI STRADALI ....	16
1.5	I MATERIALI ALTERNATIVI IMPIEGABILI NELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI .....	17
1.5.1	<i>Il conglomerato bituminoso di recupero (RAP).....</i>	<i>18</i>
1.5.2	<i>Rifiuti da costruzione e demolizione (C&amp;D).....</i>	<i>20</i>
1.5.3	<i>Scorie d'altoforno elettrico, una risorsa da valorizzare .....</i>	<i>22</i>
1.5.4	<i>Ceneri volanti.....</i>	<i>28</i>
1.5.5	<i>Scarti di carbone minerario .....</i>	<i>28</i>
1.5.6	<i>Gomma di pneumatici fuori uso .....</i>	<i>29</i>
1.5.7	<i>Frantumato di vetro.....</i>	<i>34</i>
1.5.8	<i>Scarti di materie plastiche .....</i>	<i>37</i>
1.5.9	<i>Scarti di raffinerie di zucchero .....</i>	<i>40</i>
1.6	I BIO-LEGANTI, MATERIALI DEL FUTURO RISPETTOSI DELL'AMBIENTE.....	41
1.6.1	<i>Leganti a base di oli vegetali e coprodotti del legno .....</i>	<i>42</i>
1.6.2	<i>Leganti derivanti da microalghe.....</i>	<i>43</i>
1.6.3	<i>Leganti contenenti lignina .....</i>	<i>44</i>
1.6.3.1	<i>Origine della lignina .....</i>	<i>45</i>
1.6.3.2	<i>Principali campi di impiego della lignina .....</i>	<i>46</i>
1.6.3.3	<i>Utilizzo della lignina in campo stradale .....</i>	<i>47</i>
1.6.4	<i>Leganti contenenti bio-oli derivanti da oli di scarto da cucina .....</i>	<i>48</i>
1.6.5	<i>Leganti contenenti bio-oli derivanti dalla lavorazione del letame suino .....</i>	<i>49</i>
<b>2</b>	<b>IL CONCETTO DI ADESIONE E COESIONE .....</b>	<b>51</b>
2.1	ADESIONE.....	51
2.1.1	<i>Teoria dell'adsorbimento:.....</i>	<i>52</i>
2.1.2	<i>Teoria dell'ingranamento meccanico: .....</i>	<i>53</i>
2.1.3	<i>Teoria della diffusione: .....</i>	<i>53</i>
2.1.4	<i>Teoria del legame chimico:.....</i>	<i>54</i>
2.1.5	<i>Teoria acido-base: .....</i>	<i>54</i>

2.1.6	<i>Teoria del confine debole:</i> .....	55
2.2	COESIONE.....	56
2.3	DANNI CAUSATI DALL'ACQUA.....	58
2.4	IL FENOMENO DELLO SPOGLIAMENTO .....	60
2.5	FATTORI CHE INFLUENZANO IL DANNO DELL'ACQUA.....	61
2.6	PROVE PER LA MISURA DELLE PROPRIETÀ DI ADESIONE IN PRESENZA DI ACQUA.....	63
2.6.1	<i>Prove di immersione statiche</i> .....	63
2.6.2	<i>Prove di immersione dinamiche</i> .....	63
2.6.3	<i>Prove di immersione chimiche</i> .....	63
2.6.4	<i>Prove di rivestimento</i> .....	64
2.6.5	<i>Prove di assorbimento</i> .....	64
2.6.6	<i>Prove di impatto</i> .....	64
2.6.7	<i>Prove di estrazione (pull-off tests)</i> .....	65
<b>3</b>	<b>INDAGINE SPERIMENTALE .....</b>	<b>66</b>
3.1	OBBIETTIVI DELL'INDAGINE SPERIMENTALE .....	66
3.2	I MATERIALI .....	68
3.2.1	<i>I leganti</i> .....	68
3.2.1.1	Tipi di leganti impiegati .....	68
3.2.1.2	Temperature di impiego.....	74
3.2.2	<i>Gli aggregati</i> .....	75
3.2.2.1	Aggregati vergine .....	75
3.2.2.2	Aggregati da riciclo - scorie .....	75
3.2.2.3	Aggregati da riciclo – resine industriali di scarto.....	77
3.2.2.4	Aggregati pre-bitumati .....	80
3.3	IL PROGRAMMA SPERIMENTALE.....	81
3.3.1	<i>Fase 1 - Leganti modificati con compound</i> .....	81
3.3.2	<i>Fase 2 - Scorie d'altoforno e resine industriali di scarto</i> .....	82
3.3.3	<i>Fase 3 - Leganti modificati con lignine di tipo "S", "B", "M"</i> .....	83
3.4	LA PROVA BBS.....	84
3.4.1	<i>Generalità sulla prova</i> .....	84
3.4.2	<i>Descrizione dell'apparecchiatura di prova</i> .....	86
3.4.3	<i>Preparazione di provini</i> .....	90
3.4.4	<i>Nomenclatura e codifica dei provini</i> .....	93
3.4.5	<i>Esecuzione della prova</i> .....	95
<b>4</b>	<b>RISULTATI SPERIMENTALI .....</b>	<b>99</b>
4.1	GENERALITA' .....	99

4.2	VERIFICA DELLA VARIANZA ANOVA .....	100
4.3	AGGREGATI VERGINI .....	102
4.3.1	<i>Risultati sperimentali</i> .....	102
4.3.2	<i>Influenza del tipo di bitume e del condizionamento a parità di aggregato</i> .....	107
4.3.2.1	Aggregato calcareo vergine .....	107
4.3.2.2	Aggregato basaltico vergine .....	109
4.4	AGGREGATI PRE-BITUMATI .....	112
4.4.1	<i>Risultati sperimentali</i> .....	112
4.4.2	<i>Influenza del tipo di bitume e del condizionamento a parità di aggregato</i> .....	120
4.4.2.1	Aggregato calcareo pre-bitumato .....	120
4.4.2.2	Aggregato basaltico pre-bitumato .....	122
4.5	AGGREGATI DA RICICLO - EAF (ELECTRIC ARC FURNACE) .....	124
4.5.1	<i>Risultati sperimentali</i> .....	124
4.6	AGGREGATI DA RICICLO – SCARTI DI RESINE INDUSTRIALI .....	128
4.6.1	<i>Risultati sperimentali</i> .....	128
4.7	BITUMI MODIFICATI CON LIGNINA .....	131
4.7.1	<i>Risultati sperimentali</i> .....	131
4.7.2	<i>Bitume 70/100 vs 70/100 modificato con lignina di tipo “S”</i> .....	136
4.7.2.1	Influenza della lignina di tipo “S” su aggregati di calcare .....	138
4.7.2.2	Influenza della lignina di tipo “S” su aggregati di basalto .....	140
4.7.3	<i>Bitume 100/150 vs bitume 100/150 modificato con lignine di tipo “B” ed “M”</i> .....	143
4.7.3.1	Influenza delle lignine di tipo “B” ed” M” sugli aggregati di calcare .....	146
4.7.3.2	Influenza delle lignine di tipo “B” ed” M” sugli aggregati di basalto .....	148
4.7.4	<i>Confronto tra i vari tipi di lignine su aggregati di calare vergine</i> .....	151
4.7.5	<i>Confronto tra i vari tipi di lignine su aggregati di basalto vergine</i> .....	153
4.7.6	<i>Bitume SBS Hard modificato con lignina di tipo “S”</i> .....	155
1.7.6.1	Influenza della lignina di tipo “S” sugli aggregati di calcare .....	157
1.7.6.2	Influenza della lignina di tipo “S” sugli aggregati di basalto .....	159
	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>161</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>165</b>



# **1 SOSTENIBILITA' AMBIENTALE ED ECONOMIA CIRCOLARE**

## **Premessa**

In questo primo capitolo ci occuperemo del concetto di sostenibilità ambientale connesso a quello dell'economia circolare, due tematiche molto attuali che possono abbracciare molteplici settori. Nel nostro caso focalizzeremo l'attenzione su tutti gli aspetti che riguardano il settore della costruzione e manutenzione delle pavimentazioni stradali.

Il concetto di sostenibilità ambientale è stato oggetto, nel corso degli anni, di un crescente interesse da parte della società grazie anche alla crescente attenzione rivolta dai mezzi di comunicazione. Questo comportamento è frutto della maggiore consapevolezza del fatto che le risorse del pianeta non sono infinite e pertanto si dovrà operare per preservare il più possibile quelle oggi disponibili promuovendo modelli di sviluppo economico-sociale più equilibrati rispetto a quelli adottati in passato. Lo sviluppo sostenibile in realtà è un concetto multidisciplinare che spesso viene proposto come obiettivo da raggiungere e talvolta come modello di riferimento a cui tendere per superare l'”insostenibile” logica di profitto e di crescita finora cercata.

## **1.1 SOSTENIBILITA' AMBIENTALE**

Il concetto di sostenibilità ambientale è nato fra gli anni '70 e '80, quando a livello mondiale si iniziò a prendere coscienza dell'esigenza di cambiare il modello di sviluppo globale, passando dal modello di economia neoliberista, che però aveva intaccato le risorse naturali di tutto il pianeta, ad un utilizzo più ponderato e giudizioso dell'ambiente e delle sue risorse. Il concetto di sostenibilità ambientale, infatti, è basato sulla necessità di beneficiare delle risorse naturali in modo strettamente limitato alla capacità che esse hanno di rigenerarsi rispettando in questo modo i fragili equilibri di questo sistema complesso qual è quello ambientale. In una prospettiva di medio-lungo periodo è essenziale permettere alle generazioni future di godere delle stesse risorse ambientali che noi abbiamo trovato e da cui ci siamo finora in maniera sempre maggiore

serviti. Negli ultimi 50 anni, causa l'incessante processo di globalizzazione, il mondo occidentale ha inteso lo sviluppo come sinonimo di crescita materiale e quantitativa facendo in modo che i successi raccolti in campo economico abbiano implicato ingenti costi in termini umani, sociali e ambientali, dimostrando come lo sviluppo, nei modi finora perseguiti, si debba considerare insostenibile. La povertà e la disuguaglianza che possiamo osservare oggi sono la conseguenza indiretta delle stesse politiche messe in atto negli anni passati che hanno prodotto crescita economica solo per pochi e un incremento del danno ambientale fino a mettere in pericolo l'equilibrio dell'ecosistema e questo scenario non potrà che peggiorare se non si attueranno politiche responsabili. Alla luce poi della crisi degli ultimi anni, la promozione di uno sviluppo che si possa definire sostenibile, ovvero, che sappia armonizzare la tutela dell'ambiente con lo sviluppo sociale ed economico, in modo durevole ed accessibile per le generazioni future, ormai deve ritenersi una scelta obbligata.

I primi studi sul concetto di sostenibilità nascono verso la fine degli anni '80 grazie al **rapporto Brundtland** (conosciuto anche come *Our Common Future*) un documento pubblicato nel 1987 dalla Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo (WCED) in cui, per la prima volta, venne introdotto il concetto di sviluppo sostenibile. Il nome venne dato dalla coordinatrice Gro Harlem Brundtland, che in quell'anno era presidente del WCED e aveva commissionato il rapporto. La sua definizione era la seguente:

*"Sviluppo sostenibile: quello sviluppo in grado di soddisfare i bisogni della generazione presente, senza compromettere la possibilità per le generazioni future di soddisfare i propri."*

In questa definizione non si fa riferimento direttamente all'ambiente ma piuttosto alla possibilità di garantire alle generazioni future la possibilità di godere delle risorse di cui disponiamo oggi e quindi in qualche modo si cerca di identificare una strategia ambientale di lungo termine in modo da conservare le risorse naturali e la biodiversità del pianeta. Soddisfare i bisogni della generazione presente è senza dubbio un diritto che deve essere rispettato e difeso tuttavia non dimentichiamoci che sono i comportamenti e le scelte che intraprendiamo oggi a garantire o meno che questo diritto possa essere fruito dalle generazioni future. Questo ci fa capire che tutti noi siamo, nel nostro piccolo, responsabili di ciò che dovrà affrontare le prossime generazioni.

Per capire meglio il concetto di sostenibilità facciamo riferimento alla cosiddetta piramide della sostenibilità raffigurata nella figura 1

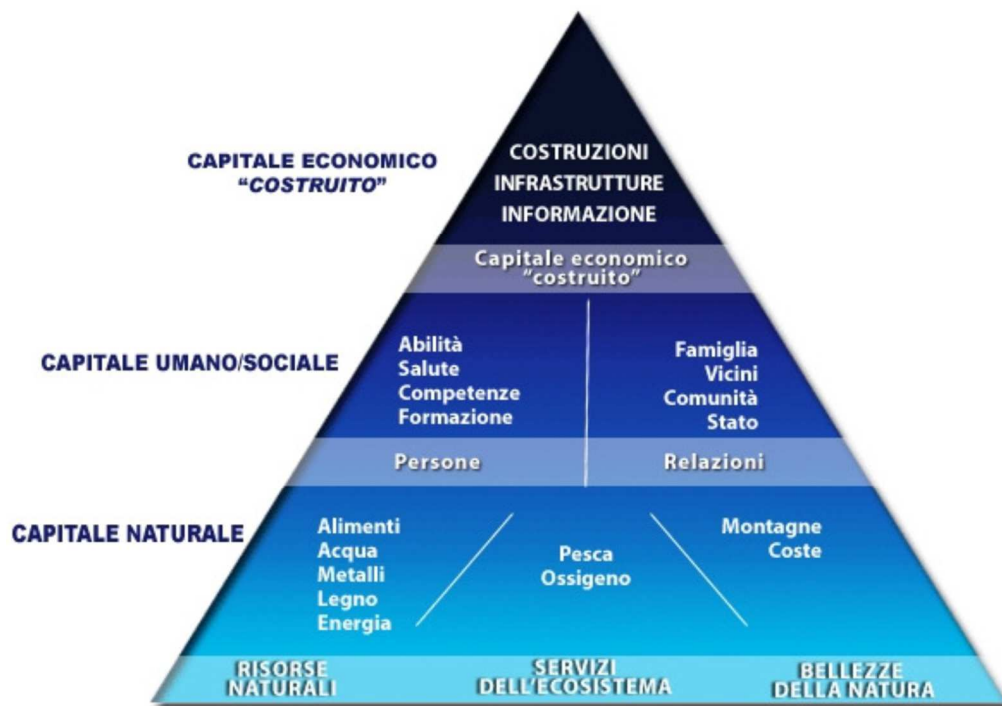


Figura 1 piramide della sostenibilità (fonte sito web sogesid)

È **interessante notare** che nel concetto generale di sostenibilità oltre al capitale naturale ovvero l'ambiente e le risorse naturali emergono altre due dimensioni; una sociale, costituita dagli individui che intessendo relazioni tra loro creano le comunità e gli stessi stati, e una economica "costruita" dagli individui con il loro lavoro e il loro sapere (costruzioni, infrastrutture, informazione).

È proprio il "sistema umano" (capitale umano/sociale + capitale economico) ad aver provocato squilibri nell'ambiente naturale con le sue attività, ma è anche il campo di intervento primario attraverso il quale è possibile assicurare uno sviluppo sostenibile in tutti e tre questi livelli. Di conseguenza il conseguimento dello sviluppo sostenibile dipende dalla capacità di assicurare una completa interconnessione tra economia società ed ambiente

In questi ultimi anni il concetto di sostenibilità ambientale è entrato sempre di più a far parte della nostra vita quotidiana basti pensare per esempio al settore dell'automotive



dove il progresso tecnologico ha fatto sì che le emissioni inquinanti derivanti dal traffico veicolare venissero sempre più ridotte fino ad essere completamente annullate nel caso dei veicoli elettrici. Altri esempi li possiamo trovare anche al settore del commercio e della distribuzione al dettaglio dove oggi sempre più aziende puntano sull'utilizzo di imballaggi biodegradabili e quindi rispettosi dell'ambiente.

## **1.2 EVOLUZIONE DEL QUADRO NORMATIVO**

IL concetto dello sviluppo integrato con la questione ambientale inizia ad essere discusso per la prima volta negli anni '70, come effetto di una presa di coscienza da parte delle organizzazioni internazionali, degli stati, delle istituzioni e degli attori sociali delle conseguenze, spesso disastrose e irrevocabili, che il tipo di sviluppo fino ad allora inseguito aveva avuto nei confronti dell'ambiente e della società, ed è in questa fase di cambiamento che si fondono le basi per l'elaborazione di una concezione, del tutto innovativa, di sviluppo sostenibile. La **Conferenza di Stoccolma delle Nazioni Unite** sull'ambiente umano, del 1972, rappresenta una pietra miliare nel processo di conquista ed evoluzione del concetto di sviluppo sostenibile. Questa conferenza è considerata una delle tappe fondamentali nonché la prima occasione in cui ci si va ad interrogare sulle problematiche ambientali connesse allo sviluppo socioeconomico. Il susseguirsi di innumerevoli avvenimenti: fenomeni di degradazione ecologica, aggravamento della povertà in certe aree del mondo uniti all'insufficienza di risultati pratici ottenuti nei dieci anni a seguito della Conferenza di Stoccolma hanno portato l'Assemblea generale delle Nazioni Unite a indire nel 1983 una Commissione Mondiale sull'ambiente e sullo sviluppo, presidiata da Gro Harlem Brundtland (primo ministro norvegese), a cui dobbiamo la più famosa e condivisa definizione di sviluppo sostenibile.

Nel famoso **rapporto Brundtland del 1987**, intitolato “**Our common future**” si introduce il termine “*sviluppo sostenibile*” definendolo come “*lo sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri*”. Gro Brundtland pone l'accento sulla non separabilità dei concetti di “ambiente” (in cui viviamo) e di “sviluppo” ed evidenzia le criticità dovute ad uno sviluppo ineguale, alla povertà e alla crescita della popolazione, che costituiscono “*uno spreco di opportunità e di risorse, in particolare umane*”. Evidenzia inoltre la necessità di una “*nuova era di crescita economica, [...] forte ma socialmente e ambientalmente*

*sostenibile*”, individuata attraverso un approccio interdisciplinare, inquadrato e partecipato ai problemi globali e al futuro comune, che rifletta tutte le realtà mondiali. Uno sviluppo che presuppone il concetto dei bisogni, in particolare quelli dei paesi poveri, e quello delle limitazioni imposte dalla tecnologia, dall'organizzazione sociale e dall'ambiente, per combinare i bisogni presenti e quelli futuri. In sintesi, è lo sviluppo che tiene in considerazione i diritti e i bisogni delle generazioni future, ovvero il patrimonio che ad esse viene lasciato in eredità. È uno sviluppo in grado di auto-generarsi, in modo che resista nel tempo e che permetta a tutti, nel presente e futuro, di beneficiarne e che promuove, accanto ai valori economici, i valori sociali e ambientali, in una logica di bisogno reciproco senza privilegiare una a discapito dell'altra, per non minare le basi ambientali e sociali su cui poggia la stessa capacità di sviluppo.

**La Conferenza delle Nazioni Unite su Ambiente e Sviluppo del 1992** costituisce un'altra tappa importante nel corpus normativo dello sviluppo sostenibile, grazie ai cinque documenti da essa scaturiti:

- *la Dichiarazione di Rio sull'ambiente e lo sviluppo*: si basa su 27 principi tesi ad “instaurare una nuova ed equa partnership globale”, nel rispetto degli interessi di tutti e per la tutela dell'integrità del sistema globale dell'ambiente e dello sviluppo.
- *l'Agenda 21*: un esauriente programma d'azione che individua le aree programmatiche di intervento, gli obiettivi qualitativi, gli strumenti e le azioni necessarie per perseguire lo sviluppo sostenibile esaltando le principali caratteristiche che dovrebbero avere le politiche di sostenibilità (cambiamento attuali modelli di consumo, integrazione di ambiente e sviluppo nel processo decisionale).
- *la Convenzione sulla biodiversità*: pone l'accento sulla necessità di strategie dedicate e di un controllo assiduo all'evoluzione e al mantenimento dei sistemi a supporto della vita della biosfera.
- *i Principi sulle foreste*: rivolti alla gestione sostenibile e alla conservazione di tutti i tipi di foreste anche se, purtroppo, non sono vincolanti.
- *la Convenzione sui cambiamenti climatici*: pone l'obiettivo di stabilizzare le concentrazioni di gas ad effetto serra a livelli che permettono il naturale adattamento degli ecosistemi al cambiamento climatico, la preservazione della produzione alimentare e uno sviluppo economico sostenibile.

Alla Conferenza presero parte i rappresentanti di oltre 170 paesi e pur non avendo valenza giuridica, i cinque documenti costituiscono il quadro di riferimento generale sul tema a livello internazionale.

Con l'arrivo del nuovo millennio venne indetta la Dichiarazione **del Millennio delle Nazioni Unite** (settembre 2000) che pianifica nuove priorità per le relazioni internazionali. Una testimonianza di solidarietà e acclarata determinazione a liberare il mondo dalla povertà, i cui obiettivi, detti Millennium Development Goals, sono individuabili nell'eliminazione dell'estrema povertà e della fame, nel raggiungimento dell'istruzione primaria universale, nell'empowerment delle donne e nella uguaglianza di genere, nella lotta all'HIV e alla malaria, nell'assicurare una sostenibilità ambientale e nell'incoraggiamento ad una partecipazione globale per lo sviluppo.

Due anni più tardi le Nazioni Unite convocarono un nuovo vertice mondiale a Johannesburg. Fu il primo importante dopo il Summit della Terra e venne chiamato **Rio+10** per i dieci anni trascorsi da quello di Rio. L'obiettivo era quello di fare il punto della situazione relativa all'ambiente ed allo sviluppo. Analizzando la situazione ci si accorse che questa era peggiorata: il degrado ecologico era aumentato, la lotta alla povertà era poco efficace, il divario tra paesi industrializzati e quelli in via di sviluppo era aumentato e la liberalizzazione degli scambi commerciali aveva influito negativamente su ambiente e globalizzazione. Dopo aver ribadito il proprio impegno nella costruzione di una *“società globale umana e solidale, consapevole del bisogno di dignità di tutti”*, i leader mondiali si sono assunti la responsabilità di promuovere e rafforzare i tre pilastri inseparabili dello sviluppo sostenibile: la protezione dell'ambiente e lo sviluppo economico e sociale, a livello locale, nazionale e globale”. Per questi motivi la **Dichiarazione di Johannesburg** conferma l'impegno e la volontà dei leader di focalizzarsi in primis sulla lotta mondiale a quell'insieme di situazioni che creano gravi minacce allo sviluppo: fame, occupazione straniera, guerre, droga, corruzione, traffico d'armi, terrorismo, disastri naturali, malattie contagiose (malaria, AIDS) nonché incitamento all'odio razziale, etnico, religioso. Nonostante i buoni propositi e l'impegno da parte dei leader mondiali nei confronti dello sviluppo sostenibile, questa dichiarazione ha il limite di non fissare né obiettivi né delle scadenze da rispettare. Nei fatti fu un percettibile fallimento. In occasione del ventesimo anniversario della Conferenza sull'ambiente e sullo sviluppo tenutasi a Rio nel 1992 e

del decimo anniversario dal Summit Mondiale sullo sviluppo sostenibile tenutosi a Johannesburg nel 2002, venne convocata un'altra Conferenza delle Nazioni Unite nel 2012 sempre a Rio de Janeiro (Rio+20). In occasione di questa conferenza venne redatto un report denominato “*The future we want*” in cui vennero ravvisati dieci temi a cui gli stati sono tenuti a intervenire ovvero:

1. sviluppo sostenibile per combattere la povertà;
2. sviluppo sostenibile come risposta alla crisi economica e finanziaria;
3. la disoccupazione e l'immigrazione;
4. l'economia dello sviluppo sostenibile, incluso produzione e consumo;
5. le foreste;
6. il cibo e la sicurezza alimentare;
7. l'energia sostenibile per tutti;
8. l'acqua;
9. le città sostenibili e l'innovazione, e
10. gli oceani.

Nel contesto dello sviluppo sostenibile e di eliminazione della povertà la Conferenza si è focalizzata sul ruolo della green economy, allo scopo di definire un paradigma nuovo in grado di mitigare le più incombenti minacce globali, come il cambiamento climatico, la perdita di biodiversità, l'esaurimento delle risorse naturali, la tutela dell'ambiente.

Come ultima tappa è opportuno ricordare la **Conferenza di Parigi** sui cambiamenti climatici del 2015. Dopo negoziati durati oltre 10 anni, oltre 190 paesi hanno raggiunto un accordo sul clima. La novità politica dell'Accordo di Parigi è stata l'adesione dei maggiori produttori di gas serra, gli Stati Uniti e la Cina, che in passato avevano rifiutato di aderire al Protocollo di Kyoto per non ostacolare la loro crescita economica. Base portante di tutto l'accordo è l'obiettivo di contenere l'aumento della temperatura ben al di sotto dei 2 gradi centigradi rispetto ai livelli preindustriali, con l'impegno a limitare l'aumento di temperatura a 1,5 gradi. I governi dovranno stabilire ed attuare obiettivi di riduzione dei gas serra prodotti dalle attività umane (anidride carbonica in primis ma anche metano). A partire dal 2023, ogni cinque anni sono previste delle verifiche degli impegni presi. Altro importante punto dell'accordo è la solidarietà tra

stati: i paesi più ricchi dovranno aiutare finanziariamente quelli più poveri con un “Green climate fund” da 100 miliardi di dollari, da istituire entro il 2020.

A marzo 2020 la Commissione europea ha presentato il piano d’azione per una nuova economia circolare che include proposte sulla progettazione di prodotti più sostenibili, sulla riduzione dei rifiuti e sul dare più potere ai cittadini, come per esempio attraverso il 'diritto alla riparazione'. I settori ad alta intensità di risorse, come elettronica, tecnologie dell’informazione e della comunicazione, plastiche, tessile e costruzioni, godono di specifica attenzione.

A febbraio 2021 il Parlamento europeo ha votato per il nuovo piano d’azione per l’economia circolare chiedendo misure aggiuntive per raggiungere un’economia a zero emissioni di carbonio, sostenibile dal punto di vista ambientale, libera dalle sostanze tossiche e completamente circolare entro il 2050. Sono anche incluse norme più severe sul riciclo e obiettivi vincolanti per il 2030 sull’uso e l’impronta ecologica dei materiali

### **1.3 L’ECONOMIA CIRCOLARE**

L’economia circolare può essere vista come un modello alternativo di produzione e sviluppo che implica condivisione, prestito, riutilizzo, riparazione, ricondizionamento e riciclo dei materiali e prodotti esistenti il più a lungo possibile.

In questo modo si cerca di estendere la vita utile dei prodotti, riducendo i rifiuti al minimo. Una volta che il prodotto ha terminato la sua funzione, i materiali di cui è composto vengono infatti reintrodotti, laddove possibile, nel ciclo economico. Così si possono continuamente riutilizzare all’interno del ciclo produttivo generando da un lato un minor consumo di materie prime e dall’altro un minor inquinamento ambientale. I principi dell’economia circolare contrastano con il tradizionale modello economico lineare, fondato invece sul tipico schema “estrarre, produrre, utilizzare e gettare”. Tale modello infatti può esistere solo se c’è la disponibilità di grandi quantità di materiali ed energia facilmente reperibili e a basso prezzo.

Oggi ci troviamo di fronte a un aumento della domanda di materie prime e allo stesso tempo a una scarsità delle risorse: molte delle materie prime e delle risorse essenziali per l’economia sono limitate, ma la popolazione mondiale continua a crescere e di conseguenza aumenta anche la richiesta di tali risorse finite.

Questo bisogno di materie prime crea una dipendenza verso altri paesi: alcuni stati membri dell'UE dipendono da altri paesi per quanto riguarda l'approvvigionamento.

Non dobbiamo poi dimenticare l'impatto sul clima: i processi di estrazione e utilizzo delle materie prime producono un grande impatto sull'ambiente e aumentano il consumo di energia e le emissioni di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>). Un uso più razionale delle materie prime può contribuire a diminuire le emissioni di CO<sub>2</sub>

Il passaggio a un'economia circolare non significa solo aggiustamenti volti a ridurre gli impatti negativi dell'economia lineare ma rappresenta un cambiamento sistemico che costruisce la resilienza a lungo termine, genera opportunità commerciali ed economiche e fornisce benefici ambientali e sociali. Il modello distingue due cicli attraverso i quali la materia scorre nei processi industriali: il ciclo biologico e il ciclo tecnico. Nel primo i materiali ritornano in sicurezza a far parte della biosfera; nel secondo, attraverso il riciclo, il riutilizzo, la manutenzione, i materiali restano nel ciclo in buona qualità e non danneggiano la biosfera. Lo scopo principale dell'economia circolare è appunto quello di mantenere staccati questi due processi.

La figura 2 rappresenta, graficamente, il meccanismo di funzionamento di un'economia circolare. Come possiamo osservare si parte dall'estrazione delle materie prime che attraverso un'accurata fase di progettazione permettono di realizzare, attraverso cicli di produzione e fabbricazione, prodotti e beni. Già in questa fase, se è stata fatta un'accurata progettazione, si può ottenere un risparmio di energie e materie prime necessarie per la realizzazione di un determinato prodotto.

Il percorso continua con la commercializzazione e l'utilizzo del prodotto da parte dell'utente finale. Anche in queste fasi si possono sperimentare comportamenti virtuosi nei confronti dell'ambiente, infatti, adottando politiche che incentivino la manutenzione e il riutilizzo si può allungare la vita utile di determinate categorie di beni. Il ciclo si completa con la dismissione del prodotto che viene conferito in appositi centri di raccolta dove i suoi componenti vengono recuperati riciclati e reimpiegati in nuovi processi produttivi. Tutto il materiale non riciclabile può essere utilizzato per la produzione di energia da impiegare nei processi produttivi per poi essere smaltito come rifiuto residuo.



Figura 2 schematizzazione economia circolare

### 1.3.1 I principi dell'economia circolare

I principi su cui si basa l'economia circolare sono tre e possono essere così riassunti

- I. preservare e valorizzare il capitale naturale bilanciando i flussi di risorse rinnovabili.
- II. ottimizzare i rendimenti delle risorse facendo circolare prodotti, componenti e materiali in uso alla massima utilità in ogni momento, sia in cicli tecnici che biologici.
- III. favorire l'efficacia del sistema rivelando eventuali criticità negative.

In base al primo principio, nel momento in cui è necessario l'uso di risorse, il sistema deve selezionare quale risorsa utilizzare e preferire quei processi e tecnologie che fanno uso di risorse rinnovabili e più performanti rispetto alle altre. Il secondo principio si rifà

alla distinzione tra cicli biologici e tecnici (McDonough & Braungart, 2002). I cicli biologici si occupano della gestione dei nutrienti biologici, cioè nutrienti rinnovabili che possono quindi essere reintegrati nella biosfera. Diversamente, i cicli tecnici riguardano elementi non rinnovabili, che sono maggiormente problematici in quanto inadatti alla biosfera. Il terzo ed ultimo principio pone l'accento sull'importanza di ridurre i danni e di evitare esternalità negative come l'inquinamento dell'aria e dell'acqua, l'inquinamento acustico e il rilascio di sostanze tossiche.

### *1.3.2 I vantaggi dell'economia circolare*

La transizione verso un'economia più circolare può portare numerosi vantaggi, tra cui:

- Riduzione della pressione sull'ambiente;
- Più sicurezza circa la disponibilità di materie prime;
- Aumento della competitività;
- Impulso all'innovazione e alla crescita economica (un aumento del PIL dello 0,5%);
- Incremento dell'occupazione; si stima che nell'UE grazie all'economia circolare potrebbero esserci 700.000 nuovi posti di lavoro entro il 2030.

Con l'economia circolare i consumatori potranno avere anche prodotti più durevoli e innovativi in grado di far risparmiare e migliorare la qualità della vita. Ad esempio, ricondizionare i veicoli commerciali leggeri anziché riciclarli potrebbe portare a un risparmio di materiale per € 6,4 miliardi all'anno (circa il 15% della spesa per materiali) e € 140 milioni in costi energetici, con una riduzione delle emissioni di serra pari a 6,3 milioni di tonnellate. Grazie a misure volte a riciclare e riutilizzare i materiali, le imprese europee otterrebbero un risparmio e ridurrebbero le emissioni di gas serra nell'ambiente. Attualmente la produzione dei materiali che utilizziamo ogni giorno è responsabile del 45% delle emissioni di CO<sub>2</sub>.



## **1.4 IL CONCETTO DI SOSTENIBILITA' AMBIENTALE APPLICATO ALLE PAVIMENTAZIONI STRADALI**

Il rapporto tra pavimentazioni stradali e sostenibilità ambientale raccoglie, di norma, l'attenzione delle cronache solo quando se ne portano alla pubblica evidenza le implicazioni più negative (impatto visivo, inquinamenti correlati con l'uso di specifici materiali, ecc.). In queste circostanze, le sovrastrutture stradali vengono sommariamente additate come causa di degrado degli ecosistemi.

"Sostenibile" nel contesto generale di una infrastruttura si riferisce alla capacità di:

- raggiungere gli obiettivi ingegneristici di affidabilità, durabilità e sicurezza;
- preservare e (idealmente) ripristinare l'ecosistema circostante;
- usare le risorse finanziarie, umane ed ambientali in maniera economica;
- soddisfare i bisogni umani fondamentali quali salute, sicurezza, equità, occupazione, comodità e felicità.

La sostenibilità è un obiettivo al quale aspirare e va raggiunta per step successivi. Inizialmente ci si dovrà focalizzare sulla possibilità di ridurre le conseguenze negative prodotte ovvero minor inquinamento, minor consumo di risorse non rinnovabili, meno produzione di rifiuti. Il passo successivo dovrebbe essere rappresentato da un comportamento neutro nei confronti dell'ambiente per poi puntare all'obiettivo finale degli impatti positivi ossia pavimentazioni che producono più energia di quanta ne consumano.

Il raggiungimento della sostenibilità di una pavimentazione passa necessariamente attraverso una serie di compromessi che bisogna mettere in conto nella ricerca di soddisfazione dei vari parametri infatti una pavimentazione meno rumorosa potrà essere più confortevole ma non necessariamente più sicura; una pavimentazione riciclata, dove molto spesso si è in presenza di inerti riciclati, difficilmente sarà più durevole; una pavimentazione più rugosa sarà più prestazionale in termini di aderenza ma comporta un maggior consumo di carburante e quindi un maggiore dispendio economico per l'utente che la percorre.

Quindi come vediamo sono molti gli aspetti che devono essere presi in considerazione dal progettista al fine di fare scelte il più possibile ponderate in relazione al contesto in cui si trova ad operare.

La progettazione e la costruzione, così come la manutenzione, delle infrastrutture stradali del domani non potrà non prescindere dall'essere un'azione con caratteristiche di sostenibilità. L'impatto ambientale che una infrastruttura stradale genera sul territorio si ripercuote per decenni. Oggi, e forse più di ieri, la prospettiva di lasciare alle prossime generazioni una qualità della vita non inferiore a quella attuale in cui viviamo è una tematica a cui tutti noi siamo tenuti a rispondere. Un impegno morale nei confronti del prossimo e dell'ambiente che ci fu insegnato da Hans Jonas (padre dell'ecologia moderna) e che oggi viene ricordato e rimarcato da molti attivisti che i mass media ci hanno abituato a conoscere.

Come detto in premessa sono molti gli aspetti che entrano in gioco quando si parla del concetto di sostenibilità applicato alle pavimentazioni stradali e in questo studio ci potremmo concentrare solo su alcuni di esse; in particolare focalizzeremmo l'attenzione solo sulle proprietà di adesione/coesione sviluppate da aggregati e leganti ecosostenibili da poter utilizzare nelle pavimentazioni stradali "green".

Come possiamo vedere le tematiche da trattare sono molto ampie e complesse e in questo studio avremmo la possibilità di analizzare e approfondire solo una parte di esse.

## **1.5 I MATERIALI ALTERNATIVI IMPIEGABILI NELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI**

Un aspetto molto importante quando si realizza una nuova pavimentazione stradale è senza dubbio il consumo di materie prime ed in particolare quello degli aggregati e del legante necessari per il confezionamento dei vari strati che la compongono. La possibilità di poter impiegare nel confezionamento delle miscele inerti provenienti dalla demolizione di vecchie pavimentazioni stradali o addirittura materiali di scarto ottenuti da lavorazioni industriali che sarebbero destinati allo smaltimento in discarica, è senza dubbio un'attività che sposa bene il concetto di sostenibilità ambientale connesso a quello dell'economia circolare.

Lo schema di figura 4 illustra i possibili impieghi dei materiali alternativi all'interno del solido stradale sia come inerti che come agenti modificanti.

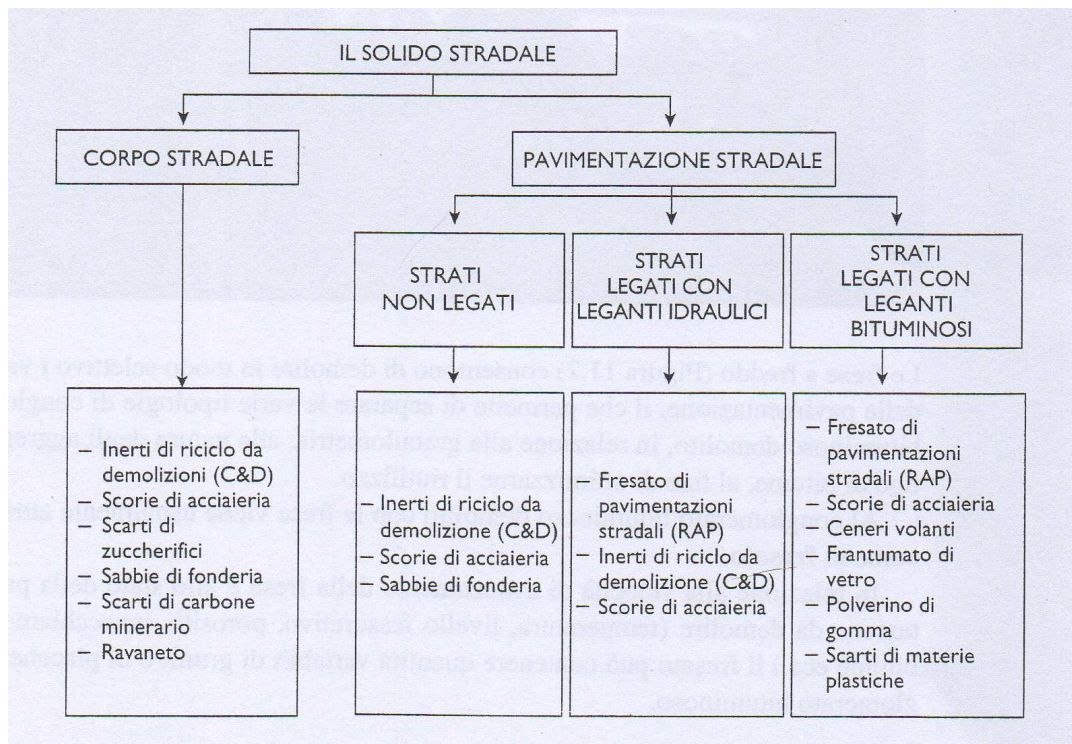


Figura 4 possibili impieghi di materiali alternativi nelle pavimentazioni stradali

### 1.5.1 Il conglomerato bituminoso di recupero (RAP)

Il conglomerato bituminoso di recupero o RAP (Reclaimed Asphalt Pavimental) è il prodotto che si ottiene dalla frantumazione meccanica delle vecchie pavimentazioni stradali, esso viene prodotto da delle macchine dotate di un tamburo rotante munito di denti al carburo che “gratta” la pavimentazione fino alla profondità stabilita. Successivamente il materiale asportato viene caricato su camion e trasportato al centro di trattamento autorizzato accompagnato da un formulario di trasporto, ovvero un documento che raccoglie informazioni utili a identificarne provenienza e quantità. Una volta raggiunto il sito di stoccaggio viene scaricato in attesa di essere lavorato.

Al momento della trasformazione da “rifiuto” a “non rifiuto”, il materiale viene sottoposto a selezione granulometrica e a tre analisi che devono dimostrare la non pericolosità per il successivo riutilizzo: le prime due misurano il contenuto di Ipa (Idrocarburi policiclici aromatici) e l’eventuale assenza di amianto; la terza è il test di cessione che verifica l’eventuale capacità dei rifiuti di rilasciare sostanze inquinanti. Una volta conclusi i riscontri e rilasciata la conformità al trattamento in atto notorio ad opera del produttore, il materiale cessa di avere la qualifica di rifiuto, e diviene materia

prima seconda, e prende il nome di “granulato di conglomerato bituminoso” come precisato dal DM 69/18. A questo punto può essere destinato a produzione di conglomerato bituminoso a caldo o a freddo o come inerte da utilizzare nelle attività di costruzione stradale. In entrambi i casi, le caratterizzazioni sono regolate da specifiche norme UNI.

Il riciclo delle pavimentazioni stradali è una pratica virtuosa sia per l'economia che per l'ambiente che dovrebbe essere sempre di più promossa e incentivata visto che in Italia la rete stradale nazionale, comunale, provinciale, regionale e statale copre una lunghezza di circa 837.493 km mentre quella autostradale circa 7mila km e tutte necessitano ogni anno di costante manutenzione. Nel 2019 si è arrivati al 25% di riciclo delle pavimentazioni stradali, migliorando di 5 punti percentuali rispetto al 2014. Ma si può fare di più, specie se ci si confronta con la media dei principali Paesi europei (60%), per non dire degli Stati Uniti, in cui il 96% del fresato viene recuperato. Già oggi, dal recupero del 25% si ottiene un risparmio in termini di materie prime di circa 300-320 milioni di euro. Dal completo riciclo si otterrebbe un risparmio di 1,2 miliardi di euro, segnala Siteb – Associazione Strade Italiane e Bitumi che ha svolto un'analisi sul riciclo delle pavimentazioni stradali in Italia confrontandola con i principali Paesi Europei (fonte Eapa – European asphalt pavement association).

Il riciclo del conglomerato bituminoso è una pratica che risponde pienamente alle logiche di economia circolare trattate in precedenza, che incentiva il riutilizzo dei materiali in successivi cicli produttivi, riducendo al massimo gli sprechi. Per questo L'Unione Europea ha adottato un piano d'azione per stimolare la transizione dell'Europa verso l'economia circolare con lo scopo di trasformare in parte l'enorme quantità di rifiuti generici prodotti ogni anno che si aggira intorno alle 2,5 miliardi di tonnellate e tra cui rientra anche il conglomerato proveniente dalla demolizione delle vecchie pavimentazioni.

Un altro aspetto da considerare è che l'impiego del conglomerato bituminoso di recupero permette di ridurre il quantitativo di bitume da impiegare nel confezionamento di una nuova miscela. Solo dal già citato 25% di fresato recuperato, Siteb ha calcolato che il suo riciclo comporta ogni anno il minor impiego di 300mila tonnellate di bitume vergine, derivante dal petrolio, e il recupero di 7,5 milioni di tonnellate di inerti. Siteb

stima che se venisse recuperato integralmente tutto il materiale proveniente dalla demolizione delle pavimentazioni stradali si otterrebbe un risparmio di 1200 milioni di euro e una riduzione delle emissioni inquinanti equivalenti a quelle generate da tre raffinerie di medie dimensioni e alla circolazione continua di 330 mila autocarri sul territorio nazionale.

Quindi il recupero del conglomerato, oltre a essere una pratica green e circolare è anche economicamente vantaggiosa, infatti, il bitume ha un costo molto elevato e pur contando quantitativamente solo per il 5% nella miscela dell'asfalto, costituita per il 95% da inerti, spesso vale circa il 50% dell'importo dell'appalto per la manutenzione della pavimentazione stradale. Non solo, tra tutti i rifiuti da costruzione e demolizione è l'unico in grado di poter recuperare anche il potere legante del bitume vecchio che si porta appresso e non solo la massa inerte, inoltre il conglomerato bituminoso di recupero, è riciclabile più volte al 100%

### *1.5.2 Rifiuti da costruzione e demolizione (C&D)*

I rifiuti da costruzione e demolizione sono tutti quelli ottenuti in occasione della demolizione di manufatti edili e stradali

Le indicazioni contenute nella direttiva europea quadro sui rifiuti e in particolare l'obiettivo che essa pone di giungere a riciclare il 70% dei rifiuti inerti derivanti dalle costruzioni e demolizioni (C&D) entro il 2020, indicano il forte interesse rivolto a tale tipologia di materiale.

La norma europea prevede che tutti i prodotti da costruzione rispondano a precise caratteristiche attestate dal marchio CE. A questo criterio non fanno eccezione gli aggregati che, a prescindere dal fatto che siano di origine naturale, artificiale o riciclata, devono soddisfare severi requisiti tecnici per essere marcati e riconosciuti idonei all'uso.

Il riutilizzo di materiali da demolizione nelle costruzioni stradali trova però ancora alcune remore da parte degli utilizzatori a causa delle perplessità che riguardano da un lato le caratteristiche tecniche e dall'altro il rispetto dei requisiti di compatibilità ambientale. Mentre per quanto riguarda le caratteristiche tecniche la letteratura relativa a tali materiali dimostra sostanzialmente che si tratta di materiali buoni e talvolta ottimi, sia dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche sia

da quello di sensibili all'acqua, non vi sono invece molti riferimenti che consentano di asserire la loro compatibilità ambientale, principalmente in relazione agli stringenti requisiti imposti dall'attuale normativa. Perplessi ulteriori permangono anche in merito ai requisiti di omogeneità e di pulizia del materiale riciclato connessi alla presenza, anche dopo il trattamento in impianto, di materie classificabili come "deperibili"

Il recupero dei rifiuti da costruzione e demolizione se eseguito correttamente permette di ottenere materiali con prestazioni analoghe a quelle di materiali vergine a prezzi nettamente inferiori il che li rende competitivi sul mercato.

In generale i rifiuti da C&D conferiti ai centri di raccolta autorizzati provengono principalmente da demolizioni delle costruzioni edili e stradali.

Essi possono essere distinti e classificati in quattro categorie:

- macerie (laterizi, piastrelle, prodotti ceramici, sfridi di lavorazioni edilizie)
- conglomerato bituminoso (ottenuti tramite fresatura di pavimentazioni stradali *in situ*);
- calcestruzzi (travi ed elementi strutturali vari in calcestruzzo armature compresse, pali di linee aeree e di vigneti, barriere new jersey, masselli autobloccanti per pavimentazioni stradali, masselli preconfezionati in calcestruzzo per mura-ture);
- terre da scavo (terre varie, materiali di drenaggio, ciottoli eccedenti le dimensioni massive accettate negli impianti di frantumazione primaria, materiali lapidei provenienti da scavi).

I diversi materiali presenti nei cumuli, in special modo le macerie, contengono frazioni di altri elementi come plastica, vetro, legno ecc., che vengono opportunamente separati dall'impianto di riciclaggio con operazioni di selezione e di trattamento.

Dopo essere stati suddivisi nelle quattro anzidette categorie, i materiali vengono veicolati in un primo vibrovaglio che provvede alla separazione della parte fine (pezzatura 0- 10 mm) da quella di pezzatura superiore che a sua volta viene immessa in un frantoio per la riduzione delle dimensioni dei granuli.

La successiva operazione consiste nella separazione del ferro dal calcestruzzo tramite un'elettrocalamita.

Una seconda definitiva operazione di vagliatura permette infine di separare il materiale in tre pezzature (0-30 mm, 30-100 mm e > 100 mm). dopodiché, per mezzo di idonei aspiratori, il materiale viene ripulito delle componenti non inerti (carta, plastica, legno ecc.).

Dall'adduzione di rifiuti inizialmente indifferenziati si perviene in tal modo a tre categorie merceologiche differenti costituite da:

- inerti lapidei di caratteristiche granulometriche predefinite;
- materiale metallico separato dalle macerie;
- frazione leggera costituita in prevalenza da materiale a elevato potere calorifico (carta, legno, plastica).

I requisiti di idoneità delle miscele non legate di aggregati riciclati per impiego nel corpo del rilevato e in alcuni strati della pavimentazione sono contenuti nella norma UNI EN 11531- 1 Che nel 2014 ha sostituito la CNR UNI 10006.

Nell'ambito del riciclaggio dei rifiuti da costruzione e demolizione può essere eseguita quella che viene definita una *demolizione selettiva* che permette di separare i residui da C&D nel momento stesso della demolizione.

Tale tecnica richiede all'origine un procedimento di disassemblaggio che in genere avviene in fase inversa alle operazioni di costruzione e ha lo scopo di aumentare il livello di riciclabilità degli scarti generati sul cantiere di demolizione. Rispetto alla demolizione tradizionale, con il conferimento delle macerie in discarica, la demolizione selettiva consente un recupero in percentuali elevate dei materiali mediante tecniche in grado di separare le diverse frazioni omogenee da inviare successivamente a idonei trattamenti di valorizzazione.

### *1.5.3 Scorie d'altoforno elettrico, una risorsa da valorizzare*

Restando sempre nell'ottica degli aggregati da riciclo anche le scorie d'altoforno potrebbero essere impiegate con successo nel confezionamento delle miscele di conglomerato bituminoso in ambito stradale.

Le scorie d'altoforno elettrico EAF (Electric Arc Furnace) sono un sottoprodotto di scarto ottenuto durante la fusione dell'acciaio in altoforno. Oggi l'acciaio viene prodotto fondamentalmente seguendo due distinti processi produttivi: il ciclo integrale, che fa uso di materie prime quali principalmente il minerale di ferro e il carbon fossile, e il ciclo a forno elettrico, che realizza la fusione del rottame ferroso, sfruttando le caratteristiche di completa riciclabilità dell'acciaio. a valle dei quali si trovano poi i diversi processi di affinazione. Dal ciclo integrale e dal ciclo a forno elettrico oltre al prodotto primario, vale a dire l'acciaio, si originano altri materiali quali le scorie, che possiedono caratteristiche e peculiarità differenti in base a molteplici fattori, che vanno dalle materie prime utilizzate alle tecnologie produttive adottate. L'industria europea dell'acciaio è concorde nel distinguere essenzialmente quattro grandi famiglie di scorie siderurgiche, che saranno brevemente descritte nei paragrafi successivi:

1. Scoria da altoforno detta comunemente loppa da altoforno;
2. Scoria da convertitore;
3. Scoria da forno elettrico;
4. Scoria da metallurgia secondaria.

#### 1) Scoria da altoforno

Nell'altoforno, il processo di produzione della ghisa liquida (lega di ferro e carbonio) è ottenuto attraverso la riduzione degli ossidi metallici contenuti nel minerale di ferro caricato nell'altoforno insieme al coke e ai fondenti calcarei, costituiti principalmente da ossidi di calcio e silicio. La scoria da altoforno, comunemente detta loppa, ha origine a seguito della separazione fisica, per differenza di densità, che si origina all'interno dell'altoforno tra la ghisa e tutti gli altri ossidi che non hanno subito la riduzione allo stato metallico. La composizione della scoria dipende dalle caratteristiche della carica, ma è costituita principalmente da ossido di calcio (CaO), ossido di magnesio (MgO) e biossido di silicio (SiO<sub>2</sub>), e in parte da ossido di alluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e modeste quantità di altri composti minerali. La loppa, estratta dall'altoforno, viene inviata a un trattamento di raffreddamento rapido e intenso, e a una granulazione. Questo processo garantisce la formazione di una fase vetrosa e di una struttura che conferisce alla loppa caratteristiche idrauliche tali da sostituire sino al 70% i materiali di carica del forno per



la produzione del cemento Portland, che sono essenzialmente calcare e argille, cioè carbonati di calcio e magnesio. Questa sostituzione permette una riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di CO<sub>2</sub> all'industria cementifera, in quanto la loppa è un prodotto che ha già subito nell'altoforno la trasformazione da carbonato a ossido col conseguente rilascio di CO<sub>2</sub>.

## 2) Scoria da convertitore

Il convertitore a ossigeno permette di produrre acciaio attraverso l'ossidazione dell'eccesso di carbonio, silicio e manganese contenuti nella ghisa liquida, alla quale viene aggiunta anche una parte di rottame per migliorare il bilancio energetico, e calce e fondenti per migliorare la pulizia del bagno di acciaio liquido. Sulla superficie del bagno, al termine del processo di conversione, si forma la scoria principalmente composta da ossidi di calce, silice, ferro e manganese, da tracce di altri metalli sia ossidati sia allo stato metallico. Il fattore che può limitare l'uso della scoria da convertitore è la non sufficiente stabilità volumetrica nel breve periodo, seppure possieda buone proprietà meccaniche e di compatibilità ambientale. Intensi studi scientifici negli ultimi anni hanno dimostrato che è possibile utilizzare la scoria da convertitore sino al 7% nel settore dei materiali ceramici e sino al 15%-25% in quello civile delle costruzioni senza intaccare le prestazioni e nel pieno rispetto dei requisiti legali. L'impiego della scoria per il recupero ambientale delle discariche è di gran lunga il più utilizzato in Europa come in Italia.

## 3) Scoria da forno elettrico

Il forno elettrico ad arco, utilizzato nell'industria siderurgica per produrre acciaio partendo dal rottame ferroso, genera un ulteriore materiale denominato scoria di acciaieria, che si forma sopra il bagno di fusione dell'acciaio, come risultato della ossidazione del rottame e dei composti generati dagli additivi inseriti nella carica del forno elettrico. La scoria di acciaieria varia a seconda del tipo di acciaio che si produce (scoria EAF-C dalla produzione di acciaio al carbonio e scoria EAF-S dalla produzione di acciaio inossidabile/altolegato) e la sua composizione chimica può presentare differenze legate alla tipologia del rottame utilizzato, alla quantità di ossigeno insufflato nel bagno e alla pratica di conduzione del forno. In linea generale, la scoria può essere

comunque assimilata alle rocce naturali effusive di origine vulcanica e consiste principalmente in una miscela ternaria di ossido di calcio (CaO), diossido di silicio (SiO<sub>2</sub>) e ossidi di ferro (FeO), alla quale si aggiungono, in percentuali minori, altri componenti. Sono in particolare queste ultime tre sostanze che determinano la differenza tra le due tipologie di scoria da forno elettrico (scoria EAF-C e scoria EAF-S).

In questo studio si focalizzerà l'attenzione sulle scorie d'altoforno elettrico ed in particolare sulle proprietà di adesione che i leganti bituminosi hanno su questo tipo di supporti anche in presenza di acqua.

#### 4) Scoria da metallurgia secondaria (SMS)

Il nome scoria SMS è l'acronimo che identifica il macrogruppo delle scorie derivanti dalla fase di affinazione fuori forno dell'acciaio, che avviene in siviera. Anche in questo caso si tratta di differenti tipologie di scorie dalle differenti caratteristiche chimico-fisiche, derivanti dai diversi cicli produttivi dell'acciaio. La principale caratteristica che differenzia la scoria siviera rispetto alle scorie EAF-C e EAF-S è la sua composizione chimica e in particolare il contenuto in ossidi di ferro e di calcio: nelle scorie SMS il contenuto in FeO è molto basso (ordine di grandezza 1%), mentre l'ossido di calcio CaO è molto alto (ordine di grandezza 50%). Altri elementi presenti, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, derivano dai formatori di scoria, dalla disossidazione dell'acciaio e dai refrattari MgO. Le scorie SMS che derivano dalla produzione di acciai alto legati possono differire rispetto a quelle derivanti dalla produzione di acciai al carbonio per una diversa quantità degli ossidi di metalli presenti. Data la presenza preponderante di ossidi di calcio e di magnesio, queste scorie dopo il raffreddamento subiscono una trasformazione del reticolo cristallino che porta alla formazione di un prodotto fine. Il loro utilizzo principale trae origine dalla loro composizione chimica, per cui rappresentano una alternativa alla calce. Una pratica consolidata è ad esempio il riutilizzo della scoria siviera nel forno elettrico, in sostituzione dei classici scorificanti quale la calce. Un altro possibile utilizzo della scoria siviera, testato e ormai consolidato, è il suo impiego quale sostitutivo della calce nella stabilizzazione delle terre

Di seguito sono riportate le principali caratteristiche delle scorie d'altoforno elettrico disponibili in letteratura.

### Proprietà fisiche

Gli aggregati derivanti da scorie di acciaio in genere presentano un peso specifico molto elevato superiore a quello degli aggregati di calcare e basalto comunemente impiegati in campo stradale, inoltre, la forma della struttura cristallina è fortemente influenzata dalla velocità di raffreddamento.

La tabella 5 elenca alcune proprietà fisiche tipiche delle scorie di acciaio.

Proprietà	Valore
Gravità specifica	3.2 - 3.6
Peso unitario, kg / m <sup>3</sup> (	1600-1920
Assorbimento	fino a 3%

*Tabella 5 proprietà fisiche della scoria di acciaio*

### Proprietà chimiche

La composizione chimica delle scorie è solitamente espressa in termini di ossidi semplici calcolati dall'analisi elementare determinata dalla fluorescenza a raggi X. La tabella 4 riporta i principali costituenti che possiamo trovare nelle scorie d'altoforno elettrico.

Costituente	Composizione (%)
CaO	40 - 52
SiO <sub>2</sub>	10-19
FeO	(70-80% FeO, 20-30% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
MnO	5 - 8
MgO	5-10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 - 3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,5 - 1
S	<0,1
Fe metallico	0,5 - 10

*Tabella 6 tipica composizione delle scorie d'altoforno*

Se la velocità di raffreddamento delle scorie di acciaio è sufficientemente bassa generalmente si formano composti cristallini. I composti predominanti sono silicato bicalcico, silicato tricalcico, ferrite bicalcica, alluminato di calcio, ossido di ferro calcio-magnesio e un po' di calce libera e magnesia libera (periclasio). Le proporzioni relative di questi composti dipendono dalla pratica di produzione dell'acciaio e dalla velocità di raffreddamento delle scorie d'acciaio. La calce libera si idrata rapidamente e può causare grandi variazioni di volume in un periodo di tempo relativamente breve (settimane), mentre la magnesia si idrata molto più lentamente e contribuisce all'espansione a lungo termine che può richiedere anni per svilupparsi.

La scoria di acciaio è leggermente alcalina, con un pH della soluzione generalmente compreso tra 8 e 10. Tuttavia, il pH del percolato dalle scorie di acciaio può superare 11, un livello che può essere corrosivo per tubi in alluminio o acciaio zincato posti a diretto contatto con le scorie. In letteratura sono stati riportati precipitati di Tufalike, risultanti dall'esposizione di aggregati di scorie di acciaio sia all'acqua che all'atmosfera. Il tufo è un precipitato bianco e polveroso costituito principalmente da carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Si trova in natura e di solito si trova nei corpi idrici. I precipitati tufacei associati alle scorie d'acciaio sono attribuiti al percolato che si combina con l'anidride carbonica atmosferica. La calce libera nelle scorie di acciaio può combinarsi con l'acqua per produrre una soluzione di idrossido di calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). In seguito all'esposizione all'anidride carbonica atmosferica, la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) viene precipitata sotto forma di tufo superficiale e sedimento polverulento nelle acque superficiali. È stato segnalato che i precipitati di tufo ostruiscono i percorsi di drenaggio nei sistemi di pavimentazione

### Proprietà meccaniche

Le scorie di acciaio presentano in genere buone proprietà meccaniche legate all'abrasione e alla frantumazione, la tabella 5 sottostante riporta quelle principali rilevate con procedura di prova standardizzate

Proprietà	Valore
Abrasione di Los Angeles (ASTM C131), %	20 - 25
Perdita di solidità del solfato di sodio (ASTM C88), %	<12
Angolo di attrito interno	40 ° - 50 °
Durezza (misurata dalla scala di Mohs della durezza minerale) *	6 - 7
California Bearing Ratio (CBR), % dimensione superiore 19 mm (3/4 pollici) **	fino a 300
* La durezza della dolomite misurata sulla stessa scala è da 3 a 4.	
** Il valore CBR tipico per il calcare frantumato è del 100%.	

Tabella 7 proprietà meccaniche delle scorie di acciaio

### Proprietà termali

A causa della loro elevata capacità termica, è stato osservato che gli aggregati di scorie di acciaio trattengono il calore molto più a lungo rispetto agli aggregati naturali convenzionali. Le caratteristiche di ritenzione del calore degli aggregati di scorie di acciaio possono essere vantaggiose nei lavori di riparazione dell'asfalto con miscele calde a basse temperature perché aiutano a non disperdere il calore facilitando le operazioni di posa in opera.

#### 1.5.4 Ceneri volanti

Le ceneri volanti sono particelle di piccole dimensioni prodotte nel corso della combustione delle centrali a carbone o negli impianti di incenerimento

Essendo fortemente inquinanti, richiedono un complesso e oneroso trattamento per il loro smaltimento.

Nel settore stradale rappresentano una valida alternativa al filler per la realizzazione di strati di usura di tipo *anti-skid*.

La loro idoneità risulta verificata sperimentalmente sia in termini di stabilità della miscela bituminosa ma soprattutto in riferimento alle caratteristiche superficiali (resistenza di attrito radente e macro-rugosità).

#### 1.5.5 Scarti di carbone minerario

Tra i materiali alterativi che aiutano a ridurre l'uso di risorse non rinnovabili e limitano l'espansione dei siti di deposito si annoverano anche gli scarti di carbone minerario.

Il Carbone grezzo, prima di essere venduto, subisce, all'interno di un impianto di arricchimento/lavaggio, un processo che serve a rimuovere il materiale non combustibile e le componenti di zolfo inorganico. L'arricchimento del carbone, basato su un processo fisico a umido, produce due flussi di rifiuti: i materiali fini, che sono scaricati come una fanghiglia in un bacino di raccolta, e il materiale grossolano la cui dimensione compresa tra 0.1 I e 120 mm.

Dal punto di vista litologico questi materiali sono costituiti da pietra calcarea, argilla carbonica nera, limo, arenaria e scisti argillosi. Generalmente è stoccato vicino all'impianto in cui ha luogo il processo.

Per determinare le caratteristiche intrinseche del materiale si provvede a effettuare specifici test di laboratorio e prove sperimentali *in situ* che per ogni luogo di estrazione forniscono informazioni di natura chimica e geotecnica.

Dal punto di vista chimico, tali materiali mostrano una concentrazione di componenti potenzialmente dannose notevolmente inferiore rispetto ai limiti previsti dalla legislazione vigente.

Gli studi per l'utilizzo di tali materiali, condotti anche Sulla base di applicazioni in vela grandezza, sono orientati verso la valutazione delle prestazioni meccaniche (mediante prove di carico statico e dinamico) Che permettono di valutare la loro possibile utilizzazione nei rilevati stradali. Le indagini effettuate rivelano che in generale, a fronte di un contenuto d'acqua particolarmente variabile e una distribuzione continua della curva granulometrica, il materiale sembra offrire buona portanza ma una scarsa resistenza alla frantumazione (prova Los Angeles), che può essere giustificata come conseguenza della presenza del Carbone.

#### *1.5.6 Gomma di pneumatici fuori uso*

Il recupero e riutilizzo degli pneumatici fuori uso (PFU) consente un significativo risparmio di risorse e un importante contributo al rispetto dell'ambiente.

Il riciclaggio di questi materiali avviene generalmente in prodotti a base di gomma (zerbini, soles di scarpe, tappetini da automobile, borse, sedili) oppure all'interno dei conglomerati bituminosi.

L'impiego dei PFU nella tecnica stradale costituisce un aspetto di notevole interesse soprattutto grazie al potenziale miglioramento delle prestazioni offerte dalle pavimentazioni realizzate con tali materiali. Il polverino da PFU può essere incluso all'interno dei conglomerati bituminosi con due diverse modalità:

- ✓ tramite tecnologia *wet*, mediante la quale il polverino viene disperso all'interno del bitume, modificandone le caratteristiche viscoelastiche;
- ✓ tramite tecnologia *dry*, nella quale il polverino sostituisce una parte degli aggregati lapidei, modificando le caratteristiche del risultante scheletro litico e dando luogo a una limitata interazione con il legante bituminoso.

In entrambi i casi le proprietà del prodotto composito (legante o conglomerato) sono fortemente dipendenti, oltre che dal dosaggio di polverino, anche dalle sue caratteristiche fisico-chimiche, notevolmente variabili in funzione del particolare processo di trattamento cui sono sottoposti i PFU e della natura della gomma soggetta a lavorazione. Quest'ultima può infatti variare a seconda delle specifiche mescole impiegate dai produttori e della iniziale destinazione d'uso degli pneumatici. A tale proposito si rileva che negli pneumatici per automezzi pesanti viene generalmente impiegata una percentuale di gomma naturale superiore a quella contenuta negli pneumatici per veicoli leggeri.

#### Tecnologia wet

Nella tecnologia *wet*, la dispersione delle particelle di polverino all'interno del bitume avviene a una temperatura di 175-225 °C, mediante accurata miscelazione meccanica. A seconda del tipo e dosaggio di polverino impiegato, nonché delle modalità di stoccaggio del prodotto risultante, i leganti bituminosi prodotti con tale tecnologia possono essere distinti in due categorie, cui corrispondono ambiti di impiego differenti:

- leganti ad alta viscosità (*asphalt rubber*);
- leganti a più bassa viscosità (*terminal blend*).

Per quanto riguarda *l'asphalt rubber*, immediatamente dopo la miscelazione, tale tipo di legante viene mantenuto in agitazione a elevata temperatura (150-215 °C) per un periodo di tempo, dell'ordine dei 45-60 minuti, necessario affinché possano verificarsi i fenomeni di interazione tra i due materiali componenti. In particolare, in questa fase le particelle di polverino tendono ad assorbire una parte delle frazioni aromatiche del bitume, dando luogo a un sensibile rigonfiamento e alla contestuale formazione di un gel che conferisce al legante peculiari caratteristiche chimico-fisiche. Ne risulta un materiale composito nel quale le singole particelle di polverino mantengono la loro integrità e sono distinguibili, anche visivamente, dalla matrice nella quale sono incluse. Tali leganti vengono denominati "ad alta viscosità" in quanto a una ben definita temperatura di riferimento (175 °C) posseggono una viscosità non inferiore a 1,5 Pa \* s. Essi generalmente contengono una percentuale di polverino, espressa in peso rispetto al peso del legante complessivo, pari ad almeno il 15% (con valori tipici compresi tra il 17 e il 22%). Lo stoccaggio di tali prodotti deve avvenire in serbatoi dotati di idonei sistemi di agitazione allo scopo di garantire una omogenea e stabile dispersione delle particelle di polverino. Le caratteristiche del legante risultante dal processo di modifica sono dipendenti, oltre che dalla costituzione chimica dei due materiali componenti, dal dosaggio di polverino nonché dalla dimensione e dalla morfologia delle sue particelle. L'entità di tali processi di interazione con il bitume tende a crescere con l'incremento del dosaggio e della superficie specifica del polverino. In tal senso, risultano più reattivi i polverini di pezzatura più fine costituiti da particelle rugose e di forma irregolare. Tali fattori debbono essere tenuti in considerazione per la selezione del polverino da impiegarsi nel processo di modifica *wet*.

Quando si utilizzano leganti denominati *terminal blends* si raggiungono valori di viscosità più bassi in ragione del fatto che vengono impiegati polverini di pezzatura più fine (solitamente passanti allo staccio da 0,3 mm) e con un dosaggio inferiore (in genere non superiore al 10%). Per effetto della elevata superficie specifica del polverino, la sua interazione con il bitume avviene piuttosto rapidamente durante la miscelazione, con la conseguente creazione di una matrice macroscopicamente omogenea nella quale non sono più distinguibili le particelle originarie. Non sussistendo rischi di stabilità, il prodotto finito può essere fatto ricircolare all'interno dei normali serbatoi di stoccaggio presenti negli impianti di produzione dei conglomerati bituminosi, senza la necessità di



predispone particolari dispositivi di agitazione. Quando la produzione di tali leganti avviene presso le raffinerie, essi vengono solitamente denominati *terminal blends*; se invece, utilizzando opportuni accorgimenti tecnici, essi vengono preparati direttamente presso gli impianti di produzione dei conglomerati bituminosi, si parla di *field blends*.

### Tecnologia dry

Nell'ambito della tecnologia *dry*, il polverino da PFU viene aggiunto presso l'impianto di produzione del conglomerato bituminoso come componente addizionale della miscela. Non essendo prevista alcuna miscelazione preventiva con il bitume, vengono impiegati opportuni dosatori che introducono il polverino direttamente nella camera di miscelazione, avendo cura di indurre una dispersione sufficientemente omogenea all'interno della massa degli aggregati. Il polverino viene solitamente impiegato con dosaggi compresi tra l'1 e il 3% riferito al peso complessivo degli aggregati, avendo cura di verificare che la sua distribuzione granulometrica, espressa in termini volumetrici per tenere conto della differente densità delle due tipologie di particelle, sia compatibile con quella della frazione lapidea. Sulla base di quanto riportato in letteratura, possono essere impiegati polverini di differente pezzatura, compresi tra quelli a grana grossa (passanti allo staccio da 6 mm e trattenuti allo staccio da 2,36 mm) e quelli denominati "ultra fini" (passanti allo staccio da 0,3 mm). A seconda della loro dimensione, le particelle di polverino forniscono quindi un contributo al riempimento dei vuoti oppure conferiscono allo scheletro litico particolari caratteristiche elastiche.

Gli studi documentati in letteratura indicano che utilizzando la tecnologia "dry" è possibile produrre miscele chiuse, semichiose (*gap graded*) e semi-aperte (*open-graded*). La percentuale di legante da impiegare deve essere definita tenendo conto del fatto che il polverino tende ad assorbire, anche durante le fasi di trasporto e messa in opera della miscela, una quota parte della frazione aromatica del bitume impiegato.

Malgrado la tecnologia *dry* sia stata sperimentata già a partire dagli anni '70, i risultati contrastanti ottenuti nelle applicazioni di campo hanno di fatto limitato il suo sviluppo e la sua diffusione. In molti casi, in presenza di polverino a grana grossa (con dimensioni superiori a 4,75 mm), si sono verificati rilevanti dissesti nella forma di sgranamenti e fessurazioni.

Gli studi documentati in letteratura indicano che i bitumi modificati con polverino di gomma prodotti con le tecnologie “dry” o “wet” possono essere utilizzati per realizzare miscele chiuse, semichiusate (*gap graded*) e semi-aperte (*open-graded*).

In particolare, i leganti *asphalt rubber* debbono essere destinati alla formazione di conglomerati bituminosi in cui la curva granulometrica degli aggregati sia caratterizzata da una certa discontinuità, necessaria per poter creare una porosità interna che sia sufficiente per accogliere le particelle di polverino. È questo il caso delle miscele di tipo *gap-graded* e *open-graded*, il cui uso negli strati di usura è stato ampiamente sperimentato tanto nell'ambito della costruzione di nuove infrastrutture quanto nella manutenzione e riqualificazione di quelle in esercizio. In alcuni casi è stata inoltre impiegata la combinazione delle due miscele, con la posa in opera del conglomerato *open-graded* al di sopra di uno strato di collegamento di tipo *gap-graded*.

I prodotti che ricadono invece nella categoria dei *terminal blends* possono essere utilizzati nella preparazione di miscele **chiuse** a granulometria continua, del tutto simili a quelle di tipo ordinario. Le più frequenti applicazioni sono negli strati di usura per i quali sono richieste caratteristiche di durabilità particolarmente elevate.

I conglomerati bituminosi *gap-graded* e *open-graded* rientrano rispettivamente nella categoria delle miscele di tipo "semi-chiuso" (con vuoti residui in opera dell'ordine del 5-8%) e "semi-aperto" con vuoti dell'ordine del 12-17%). Grazie alla discontinuità della distribuzione granulometrica degli aggregati, entrambi sono caratterizzati da una rilevante macro-tessitura superficiale che conduce a elevati valori dell'aderenza disponibile all'interfaccia pneumatico-pavimentazione anche in presenza di precipitazioni meteoriche. Mentre i conglomerati "gap-graded" sono di fatto impermeabili all'acqua, quelli "open-graded" presentano una porosità interna di morfologia ed entità tale da consentire alle acque meteoriche di filtrare attraverso di essi, producendo un ulteriore innalzamento dell'aderenza in ragione della creazione di un contatto asciutto in tutte le condizioni ambientali. A tale effetto, come nel caso delle tradizionali miscele "drenanti" (aperte), si accompagnano inoltre alcuni vantaggi connessi con l'eliminazione degli effetti "spiasi" e "spray", fonti di potenziale pericolo per la sicurezza degli utenti della strada. La suddetta discontinuità della curva granulometrica, oltre ai positivi riflessi sulle caratteristiche superficiali, ha anche degli effetti sulla struttura interna di entrambe le tipologie di miscela. Gli aggregati di

maggiori dimensioni creano infatti, nel caso in cui posseggano adeguate caratteristiche di forma, uno scheletro lirico che irrigidisce la miscela e che si oppone efficacemente all'accumulo di deformazioni permanenti sotto carico.

In Italia l'impiego del polverino da PFU come agente modificante del bitume è limitato a poche applicazioni "sperimentali" per effetto della notevole diffusione del bitume modificato con polimeri che garantisce prestazioni superiori a costi simili e talvolta anche inferiori. A favore dell'uso del polverino da PFU all'interno dei conglomerati bituminosi, oltre ai benefici tecnici e ambientali, rimane la riduzione del rumore da rotolamento.

Difatti, l'esigenza di abbattere il rumore e la possibilità di evitare l'installazione di barriere antirumore hanno portato alla realizzazione di tappeti di usura prevalentemente del tipo *open-graded* con la tecnologia *wet*. Con gli stessi obiettivi, a partire dal 2015, è iniziata a diffondersi anche la metodologia *dry* associata al bitume modificato con polimeri ad alta lavorabilità. Vengono in questo modo messe insieme tre tecnologie innovative per ottenere una pavimentazione di grande pregio infatti:

- il bitume modificato con polimeri di tipo hard garantisce elevate prestazioni meccaniche;
- l'alta lavorabilità (tecnica del warm mix asphalt) consente di adottare temperature di miscelazione e stesa inferiori eliminando i fumi particolarmente fastidiosi per il personale addetto alla stesa;
- l'aggiunta, in fase di miscelazione, del polverino da PFU "ultrafine" apporta una sensibile riduzione del rumore di rotolamento.

### 1.5.7 *Frantumato di vetro*

La disponibilità attuale di vetro riciclato dipende dal tipo e dall'adeguatezza dei metodi di raccolta adoperati nonché dai costi e dagli incentivi dedicati al settore. Il frantumato di vetro viene principalmente impiegato nell'industria vetraria per la produzione di nuovo vetro, con ingenti risparmi non solo ambientali ma anche economici. Tuttavia, per un efficace riutilizzo in tale ambito, esso deve possedere elevati standard di pulizia,

deve cioè essere selezionato e ripulito da ogni tipo di inquinante che possa compromettere i macchinari di produzione o le prestazioni del prodotto finito.

Il recupero del frantumato di vetro parte da una iniziale e sommaria selezione capace di produrre ingenti quantità di materiale di scarto costituito principalmente da vetro eliminato involontariamente e da altre sostanze presenti in minore percentuale.

tale fase si verifica un certo squilibrio tra la produzione di vetro bianco e colorato con la conseguente generazione di un'elevata quantità di scarto destinato comunque alla discarica. Utilizzando quindi unicamente la porzione costituita da vetro di colorazione variegata o che risulta inquinato da sostanze come ceramica, plastica, laterizi o impurità, in sostituzione di parte degli aggregati di miscele bituminose per pavimentazioni stradali (*glassphalt*) si riesce a trasformare un materiale di scarto in un materiale da costruzione. Il fatto che l'uso del vetro riciclato nelle costruzioni stradali rappresenti poi, in diversa misura, un vantaggio economico più o meno rilevante dipende notevolmente dall'organizzazione del processo di raccolta, nonché dal tipo di materiale che si vuole impiegare.

La normativa esistente ha avuto da tempo il merito di identificare il rifiuto di vetro, indicandone la tipologia, la provenienza, le caratteristiche e le possibili attività di recupero, nonché la possibilità di impiego in "pavimentazioni anche stradali". Pur se esistevano da tempo i presupposti per l'impiego degli scarti nel settore dell'edilizia e dell'ingegneria civile, per lunghi anni, tale processo non è risultato favorito a causa della presenza di ostacoli di carattere normativo nell'ambito delle procedure di recupero.

Fortunatamente, nel seguito, le principali restrizioni<sup>o</sup> sono state eliminate cosicché attualmente i principali Capitolati per miscele stradali, redatti sulla base di valutazioni prestazionali, non pongono alcuna limitazione all'impiego di materiali artificiali, come appunto il frantumato di vetro, previo superamento di requisiti minimi richiesti, uguali per tutti, suddivisi per aggregato grosso e fine.

I vantaggi che si possono avere dall'impiego del frantumato di vetro in un conglomerato sono:

- o capacità di mantenere la propria temperatura per un tempo più lungo rispetto a un normale conglomerato bituminoso, con evidenti vantaggi di gestione dell'intervallo di tempo tra la miscelazione e la stesa;

- diminuzione del contenuto ottimo di bitume di circa il 4% per ogni 10% di vetro inserito adoperando un bitume normale e di circa l'1% per ogni 10% di vetro inserito se si utilizza un bitume modificato;
- modulo resiliente e resistenza a trazione indiretta non soggetti a cali di prestazione se la presenza del vetro nel conglomerato è inferiore al 15%;
- diminuzione della permeabilità e accelerazione del processo di asciugatura della superficie della strada grazie alle proprietà impermeabili del vetro;
- aumento dell'angolo di attrito e miglioramento della stabilità delle miscele grazie all'elevata spigolosità dei granuli di vetro;
- maggiore retro-riflessione con aumento della visibilità notturna a favore della sicurezza degli utenti e con accrescimento del valore estetico della strada grazie alle elevate proprietà riflettenti del vetro (se utilizzato nello strato superficiale).

Di contro i potenziali inconvenienti che con l'impiego del *glassphalt* devono essere tenuti in conto sono:

- la scarsa adesione tra legante bituminoso e vetro che rende possibile il distacco dello strato di bitume che ricopre il granulo in seguito alle sollecitazioni del traffico con il conseguente sgranamento del piano viabile;
- la fragilità del vetro che può portare alla rottura e alla successiva ulteriore frammentazione dei granuli sotto il passaggio di veicoli pesanti.

In conclusione, il *glassphalt* può essere impiegato nelle costruzioni stradali con le normali tecniche e attrezzature, sia per la realizzazione dello strato di base, sia per quello di binder e di usura. Lo strato di usura è però quello che presenta i principali inconvenienti legati all'applicazione del frantumato di vetro poiché, trovandosi a diretto contatto con il traffico veicolare e con gli agenti atmosferici, risulta sottoposto ad azioni molto più gravose rispetto agli strati profondi. L'azione di sollecitazioni meccaniche tangenziali prodotte dagli pneumatici dei veicoli va ad accentuare, specialmente in presenza di acqua, gli aspetti negativi rilevati in sede di sperimentazione relativi all'adesione tra vetro e bitume, con il conseguente distacco del bitume dalla superficie

dei granuli di vetro (spogliamento) e il successivo distacco dei granuli stessi dal manto stradale (sgranamento).

Per limitare o evitare l'insorgere di tali fenomeni che condizionano negativamente le prestazioni stradali, è quindi preferibile l'uso del frantumato di vetro prevalentemente negli strati non superficiali (base e binder) che non sono a diretto contatto con il traffico veicolare. In ogni caso le percentuali di vetro da utilizzare dovrebbero limitarsi a un quantitativo non superiore al 15% sul totale degli aggregati per i conglomerati bituminosi di tipo "base" e "binder" e a un massimo del 10% per gli strati di usura.

Dal punto di vista granulometrico, le migliori prestazioni dei conglomerati bituminosi integrati con frantumato di vetro si ottengono limitando la dimensione massima dell'aggregato a valori di 4-5 mm (in tal modo il frantumato di vetro è assimilabile a una frazione fine). Questo intervento permette di ridurre ulteriormente gli aspetti negativi legati alla forma delle particelle di vetro di dimensioni maggiori, in particolare una diminuzione dell'indice di appiattimento e un aumento della percentuale di "superficie frantumata". Va infine tenuto presente che l'aggiunta di attivanti di adesione e/o filler contenenti calce idrata come agenti anti-spogliamento migliora notevolmente l'affinità con il legante bituminoso, portando i valori ottenuti ai livelli dell'inerte naturale.

### *1.5.8 Scarti di materie plastiche*

Il principale settore di produzione di scarti di materie plastiche è costituito dall'imballaggio che, rispetto ai beni durevoli, ha un ciclo di vita molto breve.

Terminata la sua funzione, il packaging entra subito nel circolo dando luogo a rifiuti di imballaggio industriali, commerciali e dalla raccolta differenziata. Fra gli imballaggi riciclati, quelli di origine industriale e commerciale costituiscono la categoria maggiormente riutilizzata grazie al loro limitato grado di contaminazione, mentre i rifiuti d'imballaggio provenienti dalla raccolta differenziata non rendono generalmente conveniente il riciclo, vista la forte diversità di inquinanti dai quali sono contaminati e gli oneri derivanti dalle successive e necessarie operazioni di purificazione e recupero.

Le applicazioni di maggior rilievo che producono maggiori scarti di materie plastiche si collocano nei seguenti settori:

- il packaging (escluso il settore alimentare);
- i sacchi per la raccolta dei rifiuti;
- il film agricolo per la pacciamatura;
- l'automobilistico;
- la produzione di semilavorati;
- i contenitori per liquidi;
- la produzione di nuova plastica (in questo settore viene reimpiegato soltanto il 15% circa).

Il settore dei conglomerati bituminosi per pavimentazioni stradali rende possibile l'impiego di miscele multipolimeriche o costituite da polimeri contaminati che, invece, non possono essere riciclati attraverso le vie tradizionali.

A tal proposito, fra le tecniche di miglioramento delle proprietà meccaniche dei conglomerati bituminosi, l'additivazione delle miscele con scarti di materie plastiche rappresenta una soluzione di notevole interesse, per aspetti relativi alle problematiche ambientali e alla tecnica stradale vera e propria.

Gli scarti di materie plastiche possono essere impiegati nei conglomerati bituminosi in forme diverse:

- come additivi immessi direttamente nella camera di miscelazione durante il confezionamento degli impasti;
- come agenti modificanti del bitume per migliorarne le proprietà reologiche favorendo un aumento della viscosità;
- come sostituzione di alcune componenti dell'aggregato lapideo.

La forma di impiego più praticata risulta essere la prima, sia per i miglioramenti che possono essere ottenuti nelle prestazioni fisico-meccaniche delle miscele, sia per motivi di ordine pratico quali la semplicità di produzione (visto che non è richiesta alcuna modifica degli impianti né sostituzione dei leganti bituminosi normalmente utilizzati) e la flessibilità ed economicità (la fabbricazione delle miscele additivate può essere ottenuta "a domanda" anche per piccole quantità).

Di contro, la scarsa affinità chimica tra i bitumi e gli scarti di materie plastiche ne ha invece scoraggiato l'uso in qualità di additivi capaci di migliorare stabilmente le prestazioni reologiche del legante; le plastiche, infatti, non sono miscibili direttamente col bitume e pertanto conviene aggiungerle direttamente alle miscele nel corso del confezionamento degli impasti.

I conglomerati bituminosi ottenuti con l'aggiunta di materie plastiche vengono detti "additivati" per sottolineare il fatto che intervengono prevalentemente le interazioni fisico-meccaniche tra l'additivo polimerico e le miscele bituminose nel loro complesso, a differenza di quanto avviene per i bitumi modificati, nei quali si verificano interazioni di natura chimica tra le frazioni malteniche del bitume e i polimeri.

Gli effetti prodotti dalle plastiche nei conglomerati bituminosi in relazione alla loro natura e alle loro caratteristiche fisiche generalmente consistono:

- in un aumento della viscosità del mastice, per effetto della presenza del polimero;
- nella funzione di "armatura" svolta dagli elementi di plastica sufficientemente lunghi e rigidi per creare dei ponti all'interno dello scheletro minerale;
- in un'azione bloccante, dovuta alla deformabilità delle plastiche che, raggiunto lo stato semifuso in fase di stesa, vengono termoformate durante il costipamento.

A seconda della natura delle plastiche, del loro dosaggio e della possibilità di disperderle nella massa degli aggregati, possono essere ottenuti effetti complessi che portano a un aumento della resistenza all'accumulo di deformazione permanente per fluage delle miscele bituminose (cui si accompagna un aumento della rigidità delle miscele) e anche a un miglioramento della loro suscettività termica.

In qualche caso le plastiche possono svolgere uno specifico ruolo di additivo addensante risolvendo il problema della colatura del legante e della segregazione delle miscele durante il trasporto e la posa in opera.

Per quanto attiene alle dimensioni della plastica, va tenuto presente che la finezza di macinazione agevola la fusione delle plastiche, la loro dispersione nella massa degli aggregati e la possibilità di interagire con il bitume, esaltando gli effetti dell'additivazione. Le plastiche che traggono maggiore beneficio dalla riduzione delle dimensioni sono quelle più reattive. Plastiche di pezzatura grossolana (> 10 mm) sono da escludere per i conglomerati



destinati agli strati d'usura, a causa dei difetti di superficie che possono essere prodotti: sgranamenti, strappi degli elementi di maggiori dimensioni affioranti dal piano viabile e disomogeneità dell'aspetto visivo della superficie stradale.

Per un dato tipo di plastica, il suo dosaggio e quello di bitume devono tener conto della destinazione d'uso delle miscele e degli effetti che la plastica è capace di esercitare sulle loro proprietà fisico-meccaniche (in particolare per quanto attiene alla resistenza all'ormaiamento e alla fragilità alle basse temperature di esercizio). Per le poliolefine, che per dimensione e forma riescono a fondere completamente durante il confezionamento dei conglomerati, il tasso di additivazione ottimale si colloca generalmente tra lo 0,5% e l'1,5% rispetto al peso degli aggregati lapidei. Dosaggi maggiori possono essere adottati nel caso di miscele ricche in legante e in presenza di bitumi meno duri rispetto a quelli normalmente impiegati per i conglomerati tradizionali. Nel caso di miscele PVC e PET, poco reattive, è stato verificato sperimentalmente che l'impiego fino al 5% di plastica nei conglomerati per strati di base e di collegamento conferisce alle miscele un miglior comportamento elastico e una riduzione della deformazione plastica residua, a fronte di una modesta perdita di rigidità. I risultati delle prove di resistenza all'azione dell'acqua delle miscele addivate con plastiche prive di impurità mostrano sempre un miglioramento di tale prestazione.

### *1.5.9 Scarti di raffinerie di zucchero*

Tra i materiali impiegabili nelle costruzioni stradali considerati **rifiuti** e altrimenti destinati a discariche o inceneritori, rientrano anche gli "scarti" dalla lavorazione della barbabietola da zucchero. Si tratta in particolare della **calce di defecazione** originata dalla purificazione a carbonatazione di calcio (operazione denominata, appunto, defecazione) del succo non trattato prodotto nel corso del procedimento adottato per estrarre il saccarosio dalla barbabietola da zucchero.

In ambito stradale, un possibile campo di impiego di tale materiale consiste nell'utilizzarlo assieme a terreni argillosi in un mix stabilizzato a calce per la costruzione dei rilevati.

Uno studio specifico in tale ambito ha consentito di verificare le caratteristiche prestazionali (capacità portante, resistenza a compressione, suscettività all'acqua) di un terreno argilloso del gruppo A7-6 trattato con differenti percentuali di calce di de-

fecazione e tipologie di stabilizzazione (calce idrata, calce idraulica, calce idrata e cemento), tenendo presente che quantitativi di calce di defecazione maggiori del 20% non possono essere impiegati per problemi di lavorazione.

I test di laboratorio hanno mostrato che la resistenza meccanica e la suscettività all'acqua delle diverse miscele, anche se differenti per tipo e quantità di legante, possono soddisfare pienamente i requisiti previsti per le stabilizzazioni con calce. In particolare, lo studio relativo all'accumulo delle deformazioni sotto l'azione di carichi dinamici non ha evidenziato comportamenti incompatibili con le condizioni di esercizio.

Il rilevato sperimentale in vero grandezza, realizzato sulla base dei risultati ottenuti in laboratorio, ha fornito caratteristiche di portanza notevolmente superiori ai requisiti minimi richiesti per un rilevato costruito con materiali convenzionali, il che dimostra che è possibile costruire rilevati stradali impiegando miscele di argilla e calce di defecazione opportunamente stabilizzate.

## **1.6 I BIO-LEGANTI, MATERIALI DEL FUTURO RISPETTOSI DELL'AMBIENTE**

Restando nell'ottica dell'ecosostenibilità di una pavimentazione è necessario porre l'attenzione anche sui leganti che pur essendo presenti in misura molto ridotta nelle miscele rappresentano comunque la componente più costosa e anche più inquinante.

Per questo oggi sul mercato sono disponibili bio-leganti di varia natura in grado di raggiungere prestazioni analoghe a quelle dei bitumi tradizionali e che quindi offrono una valida alternativa ai derivati di origine petrolifera.

Con il termine "bio-materiali" s'intendono solitamente vari materiali di origine naturale, in particolare oli di origine vegetale ("bio-oli"), derivanti dal processo di produzione e raffinazione delle biomasse, caratterizzati da una composizione chimica simile a quella degli idrocarburi e quindi impiegabili sia sotto forma di combustibile vegetale sia nei leganti bituminosi in parziale sostituzione del bitume. Si parla in questo caso di "bio-leganti".

I bio-oli possono essere utilizzati nei leganti bituminosi in diversi modi:

- In completa sostituzione del bitume.
  - Leganti a base di oli vegetali e coprodotti del legno (resina naturale e modificata);
  - Leganti derivanti da microalghe.
- In parziale sostituzione del bitume, secondo quantitativi compresi tra il 25 e il 75% in peso del legante.
  - Leganti contenenti lignina;
  - Leganti contenenti bio-oli derivanti da oli di scarto da cucina;
  - Leganti contenenti bio-oli derivanti dalla lavorazione del letame suino.
- Come agenti modificanti del bitume, se aggiunti con un dosaggio inferiore al 10% in peso del legante.

Gli studi finora effettuati in letteratura mostrano che l'aggiunta dei bio-oli nei leganti bituminosi fornisce, in generale, una riduzione della rigidità e della consistenza, che suggeriscono le seguenti possibili applicazioni per i bio-leganti:

- Impiego nei climi freddi, al fine di garantire una minore rigidità e di conseguenza fornire un adeguato contrasto al fenomeno di fessurazione termica.
- Impiego come agente flussante, in grado di garantire una riduzione della viscosità a parità di temperatura o un abbattimento della temperatura a parità di viscosità nelle fasi di miscelazione e stesa del conglomerato bituminoso.<sup>9</sup>
- Impiego come additivo rigenerante per bitumi invecchiato, rappresentando quindi una valida soluzione nell'ambito del riciclaggio a caldo, in combinazione con alte percentuali di fresato (RAP).

### *1.6.1 Leganti a base di oli vegetali e coprodotti del legno*

Il primo brevetto in cui si parla di oli vegetali, è stato pubblicato nel 1991 (Pinomaa, 1991) dove, un sottoprodotto dell'industria cartaria è stato miscelato con un olio vegetale, un polimero ed un pigmento inorganico. È interessante notare, però, come questo, non fosse volto alla ricerca di un legante rispettoso dell'ambiente, bensì al solo fine di essere pigmentabile, essendo di base trasparente. Circa dieci anni dopo, alcune compagnie francesi, hanno, poi, studiato, brevettato e messo sul mercato i loro bio-

leganti, rifacendosi, sempre, al primo brevetto di Pinomaa (1991). In generale, tutti i brevetti, si basano sullo stesso principio esposto nel primo del 1991, andando a definire un “bio-legante a base di oli vegetali e coprodotti del legno”, come: un legante costituito da una combinazione di una componente ad alto peso molecolare come una resina naturale o modificata, un olio viscoso naturale o vegetale ed eventualmente un polimero sintetico, al fine di regolarne le proprietà reologiche (Chailleux et al., 2015). È importante sottolineare che, durante la lavorazione di questi bio-leganti, non si dà luogo ad alcuna reazione chimica, ottenendo solamente un’interazione fisica tra le varie fasi, miscelandole a temperature superiori al punto di fusione, ottenendo, così, a temperatura ambiente, una sospensione di particelle (resine) in una matrice viscosa (oli).

### *1.6.2 Leganti derivanti da microalghe*

Questo tipo di leganti si basano sull’estrazione di lipidi da microalghe, per la creazione di un bio-legante ad uso stradale, in grado di sostituire quelli a base di bitume. In questo momento, le microalghe sono una delle alternative più promettenti, possedendo i principali vantaggi rispetto alle piante terrestri, come: elevata produzione di biomassa, alto tasso di crescita, elevata resa fotosintetica, alto contenuto di lipidi (fino all'80 % in peso, in determinate condizioni di stress e per alcune specie particolari) e nessuna competizione con l'alimentazione umana.

In Francia è nato progetto "Algoroute" incluso nel programma di ricerca IFSTTAR (French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks) dedicato alla ricerca di leganti alternativi per pavimentazioni stradali, cofinanziato dalla regione "Pays de la Loire", oltre ad essere una partnership tra laboratori accademici, come l’Università di Nantes (CEISAM, GEPEA) e aziende, quali l’Algosource Technologies e l’Alpha Biotech. Una delle priorità di questo progetto, consiste nello studiare la composizione chimica di questi sottoprodotti, per comprenderne, poi, le proprietà reologiche, al fine di poterle confrontare con quelle di un bitume convenzionale

### *1.6.3 Leganti contenenti lignina*

Uno dei temi più interessanti della cosiddetta "chimica verde" è costituito dalla valorizzazione della lignina, una sostanza naturale che può essere isolata dalle biomasse. La particolare composizione chimica della lignina la rende idonea a sostituire il petrolio nella produzione di alcuni polimeri di base. Dal punto di vista ambientale, l'utilizzo della lignina permette di ottenere un duplice vantaggio; da un lato permette di ridurre l'impiego di prodotti derivanti da combustibili fossili e dall'altro le coltivazioni agro-industriali da cui si ricava la lignina fissano la CO<sub>2</sub>, contribuendo a diminuire la concentrazione dei gas ad effetto serra nell'atmosfera. L'interesse a sviluppare la tecnologia per l'utilizzo della lignina è notevole anche in considerazione di due rilevanti fattori economici: in primo luogo si possono raggiungere prezzi molto interessanti, competitivi con quelli di prodotti derivati dal petrolio; in secondo luogo, tale risorsa può essere prodotta localmente. Il principale ostacolo ad un più generalizzato sfruttamento della lignina è costituito dalla complessità chimica che la caratterizza, poiché non sono ancora disponibili processi industriali che consentano di produrre materiali dalla costituzione chimica regolare, o molecole semplici, utilizzando i prodotti disponibili commercialmente. C'è da dire che è anche da superare il problema legato al fatto che nell'immaginario collettivo un prodotto dal basso prezzo e di scarto, in genere viene associato a basse performance e quindi scoraggia eventuali investitori

Nell'ambito di una più generale strategia di rilancio delle biomasse, l'ENEA ha realizzato presso il Centro Ricerche della Trisaia un impianto sperimentale di trattamento dei materiali lignocellulosici per la produzione di biocarburanti e pasta per carta (impianto di Steam Explosion STELE). Una delle correnti di prodotto del processo è costituito dalla lignina che è estratta ed isolata dalla biomassa preventivamente esposta a vapore d'acqua in particolari condizioni di tempo, pressione, e temperatura. La normale conduzione dell'impianto prevede che la lignina sia bruciata, contribuendo positivamente al bilancio energetico del processo. È sembrato significativo proporre un'utilizzazione alternativa della lignina che, basandosi sulle sue peculiarità chimiche, portasse a prodotti di maggior valore aggiunto. È stata quindi avviata una ricerca volta a definire le condizioni di trattamento ottimali per l'estrazione, la qualità della lignina ottenuta e la sua reattività chimica.

### 1.6.3.1 Origine della lignina

La lignina è uno dei costituenti principali dei vegetali in quanto ne rappresenta il 15-35% della massa, in dipendenza della specie. Si trova tra le pareti cellulari delle fibre ed esplica la funzione di legante impartendo durezza e rigidità alla pianta. Dal punto di vista chimico, la lignina è un biopolimero tridimensionale irregolare, dalla struttura relativamente complessa. Il peso molecolare della lignina nativa è difficile da ottenere, in quanto il processo di estrazione può provocare rotture o indurre riarrangiamenti della struttura.

La lignina riempie gli spazi nella parete cellulare conferendo resistenza meccanica alla struttura, inoltre, essa gioca un ruolo cruciale nel condurre l'acqua in maniera efficiente all'interno degli steli. La figura 6 mostra la schematizzazione della struttura della lignina.

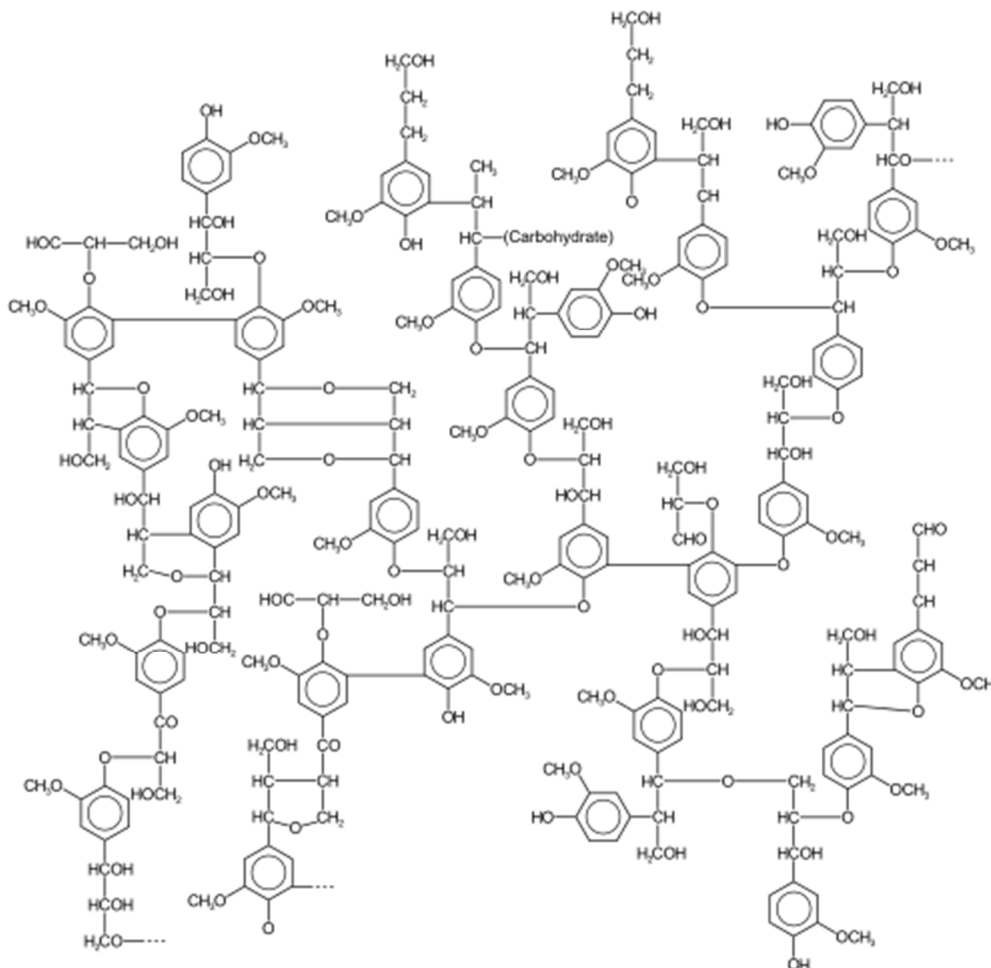


Figura 8 struttura della lignina

### *1.6.3.2 Principali campi di impiego della lignina*

L'impiego della lignina in processi industriali risale al 1878, quando si cominciò ad utilizzare i lignosolfonati nei bagni per la concia delle pelli. Oggi, i lignosolfonati sono largamente utilizzati come agenti disperdenti nella produzione di cemento. Si stima che in tutto il mondo 100.000 tonnellate di polvere e 200.000 tonnellate di liquido siano utilizzati a tale scopo. Dal punto di vista chimico-tecnologico, l'utilizzo più significativo è costituita dalla produzione di vanillina, l'aroma della vaniglia utilizzato nell'industria alimentare, cosmetica, e mangimistica. La biodegradabilità e la non tossicità della lignina viene sfruttata per produrre emendanti granulari per il terreno a rilascio controllato dei micronutrienti. Un recente brevetto prevede che i lignosolfonati possano essere inglobati in resine polimeriche fino a costituire il 23% della massa senza che vi sia perdita di proprietà meccaniche. Questo campo di applicazione si prospetta come uno dei più interessanti in quanto i gruppi funzionali della lignina si prestano a formare legami chimici con vari monomeri per formare copolimeri lignina-(stirene, -poliuretano, -fenolo, -urea). Considerando che i lignosolfonati costano circa 220£/kg mentre, ad esempio, l'urea 1.100 £/kg, è evidente il vantaggio economico che si potrebbe ricavare utilizzando la lignina anche solo come riempitivo. Le proprietà fisiche e chimiche della lignina dipendono molto dal tipo di processo con cui viene estratta dalle biomasse, in quanto la struttura nativa può essere modificata in seguito all'azione dei reagenti chimici utilizzati e delle reazioni di pirolisi. Le proprietà della lignina mediante reazioni di ossidazione, solfonazione,

Di seguito vengono riportati, a scopo indicativo, alcuni dati relativi all'utilizzo della lignina negli Stati Uniti. Purtroppo, non sono reperibili dati relativi all'Italia o ad altri paesi.

*Impieghi su grossa scala (100.000-50.000 ton, solido/anno)*

- Coformulante nel cemento
- Additivo nelle molasse per mangimi
- Legante per mangimi
- Asfalto antipolvere
- Produzione della vanillina

*Impiego su media scala (50.000-10.000 ton, solido/anno)*

- Gesso per intonaco
- Additivo nelle paste per perforazioni minerarie
- Agente disperdente per pesticidi
- Agente disperdente per pigmenti

*Impieghi su piccola scala (10.000-500 ton, solido/anno)*

- Produzione di cemento (setacciatura)
- Produzione di nerofumo
- Emulsionante/stabilizzante di emulsioni
- Trattamento delle acque e processi di purificazione
- Micronutrienti per terreni
- Produzione di batterie
- Concia delle pelli
- Additivo per gomme

*1.6.3.3 Utilizzo della lignina in campo stradale*

Il settore stradale in cui da sempre è noto il problema ambientale legato all'impegno di leganti provenienti da fonti non rinnovabili potrebbe trarre notevoli benefici dall'introduzione di questo bio-materiale.

nei Paesi Bassi, un consorzio europeo di ricercatori e industriali sta sperimentando l'utilizzo del derivato cellulosico al posto del bitume come legante per l'asfalto di strade e piste ciclabili. Le strade realizzate con il bio-composto a base di lignina sono attualmente 8 e comprendono un tratto di un sito industriale nella provincia di Zeeland percorso quotidianamente da auto e mezzi pesanti (costruito nel 2015 e ad oggi ancora in perfette condizioni), alcune strade secondarie dei dintorni, e una pista ciclabile presso la Wageningen University&Research, centro specializzato in studi agrari, divisa in 3 sezioni, ciascuna a base di un differente bio-composto (costruita nel 2017). Il bitume con cui sono state realizzate le strade sperimentali in Olanda è composto al 50% da lignina e al 50% dal tradizionale derivato petrolifero. Gli studiosi olandesi hanno



chiarito che sarà necessario modificare chimicamente la lignina per superare il limite del 50% nel composto bituminoso, tuttavia, secondo il professor Gosselink è molto probabile la realizzazione di un mix totalmente a base biologica e sostenibile.

Attualmente in Italia sono in atto numerose ricerche e sperimentazioni che hanno come obiettivo l'utilizzo e la produzione di "bio-binders" Si tratta di leganti in cui il bitume è parzialmente sostituito da un "bio-olio" ottenuto da microalghe, di origine quindi rinnovabile. Altro materiale utilizzato potrebbe essere la lignina sempre in aggiunta al bitume.

#### *1.6.4 Leganti contenenti bio-oli derivanti da oli di scarto da cucina*

Un altro esempio di biomassa promettente, da utilizzare come sostituto parziale del bitume, risulta essere l'olio di scarto da cucina (WCO – Waste Cooking Oil). Questo, infatti, rappresenta un rifiuto derivante, principalmente, dalle attività di ristorazione, ma non solo, e, eseguendo una valutazione a livello globale, si intuisce come i WCO rappresentino un sottoprodotto di ingente quantità. Provando a fornire dei numeri, per comprendere gli ordini di grandezza in questione, per esempio, l'Agenzia di Protezione per l'Ambiente degli Stati Uniti (USEPA - United States Environmental Protection Agency) ha evidenziato che, nel solo anno 2011, sono stati prodotti circa undici miliardi di litri di WCO mentre, nella sola Cina, si parla di circa cinque milioni di tonnellate, centomila delle quali prodotte a Pechino. A livello di internazionale, gli Stati considerati tra i maggiori produttori di WCO sono, come già detto, Stati Uniti e Cina ma non solo. Dal punto di vista ambientale, invece, uno dei più grandi problemi dei WCO riguarda il loro smaltimento ed il loro riciclo che, in molti casi, non viene eseguito nella maniera corretta. Infatti, una grande quantità di questi viene scaricata illegalmente nelle discariche e nei fiumi, causando, quindi, inquinamento delle risorse idriche e del suolo. Un possibile impiego di queste sostanze è quello legato alla produzione di biocarburanti mentre in capo stradale possono essere impiegante come agenti modificanti del bitume base.

Recenti studi sperimentali eseguiti su questi materiali hanno evidenziato che In generale, la presenza di WCO, migliora la duttilità ed il comportamento alle basse temperature, migliorando la resistenza nei confronti della comparsa di cricche e fessure nella pavimentazione, grazie ad una maggiore capacità di rilassamento. Con l'aggiunta,

però, di WCO si ottengono leganti più propensi all'accumulo di deformazioni permanenti, rispetto al legante di controllo, portando a successivi danni della pavimentazione. L'utilizzo di questi bio-legante potrebbe portare, nel tempo, alla necessità di interventi di manutenzione con frequenza maggiore, portando ad un conseguente aggravio dei costi e impatti ambientali. Gli interventi che si potrebbero pianificare sono: rappezzatura (patching), sigillatura delle fessure (crack sealing) o anche fresatura totale dello strato.

#### *1.6.5 Leganti contenenti bio-oli derivanti dalla lavorazione del letame suino*

Per ottenere un bio-legante, derivante dalla lavorazione del letame suino, si esegue un processo TCC (Thermo-Chemical Conversion), simile ad una liquefazione idrotermale (HTL), simile a quello usato per i bio-leganti, derivanti da residui di microalghe. Negli ultimi anni, molti ricercatori hanno studiato questo processo, in modo da renderlo il più efficiente possibile. Il TCC sfrutta il calore e la pressione per scomporre i materiali in molteplici fasi, ottenendo, come rifiuto, un bio-petrolio, un olio denso e nero, con caratteristiche energetiche simili a quelle del petrolio, propriamente detto (Ocfemia et al., 2006). Eseguendo il suddetto processo sul letame suino, si ottiene come risultato un bio-olio, successivamente frazionato al fine di ottenere una fase acquosa, ricca di azoto, fosforo e potassio (N, P, K), da poter utilizzare, come fertilizzante; - alcuni composti organici, sotto forma di olio, utilizzabili come fonte rinnovabile di energia; - un residuo solido, da utilizzare come modificatore del bitume. Secondo Fini, questo bio-legante potrebbe essere un candidato promettente, da utilizzare come modificatore parziale del bitume, in quanto andrebbe a migliorare alcune delle proprietà del legante stesso, fornendo al tempo stesso benefici, sia da un punto di vista ambientale, portando ad una riduzione di gas serra prodotti, che economici, essendo la materia prima, molto meno costosa rispetto al legante convenzionale

Da recenti sperimentazioni condotte su questo materiale si è visto che l'utilizzo di bio-olio derivante da letame suino porta ad avere una diminuzione della norma del modulo complesso ed un peggioramento di comportamento nei confronti delle alte temperature (ormaiamento), portando, invece vantaggi, dal lato di quelle basse, migliorando, quindi, il comportamento nei confronti della fatica. In questo caso, pertanto, non si dovrebbero

riscontrare grandi problematiche dal punto di vista fessurativo dovendo, invece, prestare attenzione alla presenza di ormaie. Saranno necessari, quindi, maggiori interventi per ristabilire la planarità del piano di rotolamento utilizzando, per esempio, una fresatura totale degli strati (Full Depth Reclamation - FDR) e successiva ricostruzione.

In questo studio ci siamo occupati di testare le proprietà adesive/coesive di diversi materiali alternativi impiegabili in campo stradale introdotti sia come agenti modificanti che come inerti veri e propri.

Per quanto riguarda gli inerti abbiamo valutato la possibilità di impiego di scorie d'altoforno elettrico, materiali compositi costituiti da resine catalizzate oltre che conglomerati bituminosi di recupero.

Per quanto riguarda i bitumi, invece, abbiamo valutato la possibilità di impiegare lignine e compound polimerici, ottenuti da plastiche riciclate e compound al grafene come agenti modificanti del legante.

## **2 IL CONCETTO DI ADESIONE E COESIONE**

### **Premessa**

In questo secondo capitolo verranno analizzati nel dettaglio i fenomeni di adesione e coesione che normalmente si sviluppano tra una fase liquida e una solida concentrando l'attenzione sui leganti bituminosi.

Infatti, la coesione del bitume e l'adesione tra il bitume e gli aggregati sono tra le proprietà chiave che caratterizzano la resistenza del conglomerato bituminoso nel tempo, sotto l'effetto del traffico veicolare e quindi la sua durabilità.

La perdita di adesione, infatti, implica un rapido deterioramento (stripping, raveling, ecc.) della pavimentazione sotto i carichi stradali, fenomeno che viene amplificato in presenza di umidità. Pertanto, è importante conoscere i meccanismi che regolano queste grandezze al fine di progettare pavimentazioni stradali il più possibile durevoli in relazione alle condizioni di impiego.

Oltre a riportare le varie teorie che stanno dietro ai meccanismi di adesione/coesione verranno introdotte anche le principali prove di laboratorio disponibili per quantificare tali grandezze.

### **2.1 ADESIONE**

Quando si parla di adesione si esprime non soltanto il fenomeno chimico-fisico col quale bitume ed inerte si legano tra loro durante il confezionamento del conglomerato, ma anche il contributo offerto da tale legame in termini di resistenza meccanica al materiale finale. In generale, l'adesione può essere definita come la forza molecolare di attrazione che si manifesta tra due corpi di diversa natura a contatto tra loro. Nel contesto dei conglomerati bituminosi, essa è la capacità del legante (bitume) di aderire a dei grani minerali (aggregato). L'adesione bitume-aggregato è influenzata sia dalle caratteristiche del bitume (materiale idrofobo), sia da pH e tessitura superficiale dell'aggregato utilizzato nella miscela (materiale tendenzialmente idrofilo), nonché dalle condizioni ambientali (umidità e temperatura), dalle caratteristiche superficiali

della pavimentazione (rugosità, porosità e rivestimento) e dal traffico a cui è soggetta. Il rivestimento degli elementi lapidei da parte del bitume, che avviene nella fase di confezionamento della miscela, crea una pellicola superficiale idrofoba attorno all'aggregato, ovvero impermeabile alle particelle d'acqua. La perfetta collaborazione tra il legante e gli elementi lapidei evita che l'acqua possa instaurarsi tra i due materiali, comportando conseguentemente un invecchiamento precoce della miscela bituminosa e anticipando l'insorgere di dissesti che comporterebbero la perdita di prestazioni da parte della pavimentazione. Per i sistemi di bitume-aggregato, esistono molte teorie e meccanismi per descrivere l'adesione. Queste teorie, sebbene si sovrappongano per certi aspetti, possono essere considerate cronologicamente ordinate in relazione alla tempistica con la quale si verificano, in misura più o meno accentuata, nel fenomeno dell'adesione bitume-aggregato. Nessuna di queste, presa singolarmente, riesce a spiegare completamente l'adesione, ma solo una combinazione delle stesse riesce a darne una descrizione pressoché completa.

### 2.1.1 Teoria dell'adsorbimento:

Questa teoria viene anche detta “teoria dell'energia superficiale o teoria termodinamica” e può essere applicata alla maggior parte dei casi in cui ci si trova in presenza di un liquido a contatto con un solido. Essa si basa sul concetto di bagnabilità del solido che viene espresso in funzione dell'angolo di contatto tra il liquido e il solido come illustrato nella figura 8.

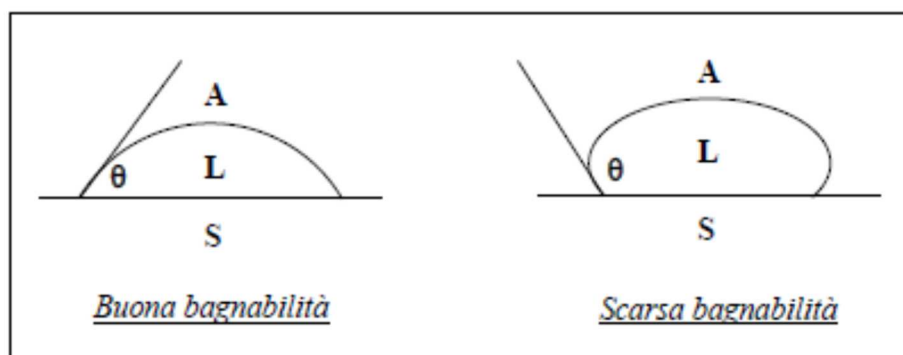


Figura 9 bagnabilità nella teoria dell'adsorbimento

Se l'angolo formato tra la superficie del solido e la tangente alla superficie del liquido è  $> 90^\circ$  (figura a sinistra) significa che il liquido si diffonde bene sul solido ne consegue che la superficie risulta essere correttamente bagnata e questo fa sì che possano svilupparsi buoni valori di adesione. Tipicamente questa condizione si realizza in tutti quei materiali che vengono detti idrofili ovvero che risultano essere affini con l'acqua e i liquidi in genere. Viceversa, se l'angolo di contatto è  $< 90^\circ$  (figura a destra) la superficie non presenta una buona bagnabilità e di conseguenza non potranno svilupparsi livelli elevati di adesione. Questo normalmente è ciò che accade nei materiali cosiddetti idrofobi ovvero con scarsa affinità con i liquidi. Ecco, quindi, che la corretta bagnabilità del liquido sul solido costituisce il primo passo verso lo sviluppo di adeguati livelli di adesione.

### *2.1.2 Teoria dell'ingranamento meccanico:*

questa teoria descrive il fenomeno adesivo soprattutto in modo intuitivo e generalmente riguarda l'unione meccanica all'interno delle cavità, dei pori e delle asperità superficiali del solido su scala macroscopica. Dopo una rapida azione bagnante, il liquido passa a riempire i micro-vuoti presenti sulla superficie del solido. Il liquido deve bagnare i passaggi capillari in modo da allontanare l'aria presente nei pori. Se il poro è chiuso ad una estremità, l'aria viene compressa ed intrappolata all'interfaccia. A contatto con l'aria o per reazione chimica diversa, il liquido inizia a solidificare costituendo in tale modo un ingranamento meccanico tra le fasi. Tale ingranamento combina la resistenza coesiva di ambedue i solidi, a formare una interfaccia che agisce come un materiale composito, con proprietà intermedie tra quelle dei due materiali adiacenti. Esso, quindi, costituisce un meccanismo chiave dell'adesione e può spiegare l'ottima resistenza di questi tipi di collegamenti all'aggressione dell'acqua. Il riempimento delle porosità ed il conseguente ingranamento sono fortemente dipendenti dalla viscosità del liquido in relazione alla sua temperatura.

### *2.1.3 Teoria della diffusione:*

Questa teoria descrive l'adesione di materiali a matrice gommosa e fortemente viscosi. Essa afferma che il collegamento è il risultato del concatenamento di lunghe catene composte attraverso la superficie, dopo che i materiali si sono inter-diffusi l'uno

nell'altro. Tale teoria, analoga concettualmente alla precedente, è indicata soprattutto nello studio dell'interazione tra bitumi diversi, quali ad esempio quello della mano d'attacco e quello del conglomerato sottostante o soprastante.

#### *2.1.4 Teoria del legame chimico:*

Questa teoria si basa sullo sviluppo di legami chimici livello molecolare e presuppone che tali legami non possano essere rotti senza danneggiare il volume di uno dei due materiali collegati, generalmente il più debole. Solitamente per favorire l'adesione chimica si applicano preliminarmente dei primer o promotori di adesione che reagiscono dapprima con l'aggregato attivandolo chimicamente e poi successivamente con il legante applicato.

#### *2.1.5 Teoria acido-base:*

secondo questo tipo di teoria il legame di adesione deriva dall'attrazione polare di acidi e basi di Lewis, ossia elementi poveri ed elementi ricchi di elettroni all'interfaccia. Le interazioni acido-base sono di notevole importanza nell'adesione dei materiali bituminosi in generale in quanto controllano la loro compatibilità con l'aggregato e possono assicurare la bagnabilità della superficie. In genere, gli aggregati si dividono in acidi-idrofili e basici-idrofobi. Gli acidi sono principalmente costituiti da quarzo (ossia  $\text{SiO}_2$  oltre il 65%) e sono caratterizzati da proprietà che sono critiche per l'adesione; mentre i basici sono costituiti principalmente da calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) ( $\text{SiO}_2$  inferiore al 40%) e sono caratterizzati da proprietà non critiche per l'adesione. ciò è giustificabile osservando che le superfici degli aggregati minerali, hanno energie elettriche differenti, in relazione al carattere dipolare delle corrispondenti petrografie ed in base a tali energie esercitano un adsorbimento diretto sulle altre molecole aventi anch'esse carattere dipolare. Ecco che, presentando gli aggregati acidi spiccate caratteristiche dipolari rispetto a quelli basici, essi adsorbiranno più sensibilmente l'acqua, nota per la sua bipolarità. D'altro canto, avendo il bitume un carattere dipolare praticamente nullo, esso adsorbirà con più facilità su aggregati minerali basici (Becker 1953). In seguito, tuttavia, si vedrà come la polarità non è dipendente soltanto dalla natura petrografia degli inerti, ma anche dalla loro attività superficiale. Infine, va detto che questo tipo di

adesione è seconda come tenacità soltanto ai legami chimici ed ha il vantaggio che può essere ottenuta anche senza fare ricorso a primer od attivanti di adesione chimici.

### *2.1.6 Teoria del confine debole:*

Questa teoria cerca di spiegare le cause che stanno alla base della mancata adesione tra due materiali. Essa suggerisce che la rottura avviene sempre in corrispondenza del collegamento più debole che si ha all'interfaccia tra materiali. Nei legami bitume-inerti, un punto di debolezza può essere costituito da una superficie del solido contaminata o degradata o troppo porosa. Tali "difetti" possono essere luogo preferenziale di rotture e talvolta possono anche essere attribuiti alle lavorazioni di cantiere: la rottura degli aggregati più superficiali in fase di compattazione, pur se ricoperti di bitume, può infatti favorirne il distacco. Anche la presenza di polvere sull'aggregato può fungere da contaminante che favorisce l'innesco della cricca e quindi il distacco prematuro del bitume sull' aggregato

Come già accennato, l'aggregato assume un comportamento adesivo diverso a seconda della natura chimica della sua roccia madre, nonché della sua attività superficiale. Esso, infatti, può essere più o meno idrofilo, mentre il bitume è tendenzialmente idrofobo (acqua-repellente). Pertanto, sulla base del carattere intrinseco dell'aggregato, esso potrebbe reagire con l'acqua, la quale ha un'influenza negativa sull'adesione e deve essere respinta dal bitume (idrofobo). Gli aggregati acidi, ad esempio, sono molto idrofili e hanno scarse proprietà di adesione in presenza di acqua. Tuttavia, nel 1980 Weinert ha concluso che la forza di adesione bitume-aggregato non dipende tanto dall'acidità della roccia, quanto dalla sua tessitura superficiale. Ne consegue che l'adesione è tanto maggiore quanto più è ruvida la superficie di contatto. Si è inoltre osservato che l'Energia di superficie di aggregati appena frantumati varia nel tempo per via della riorganizzazione delle polarità e dell'assorbimento superficiale di acqua e polvere. Tale processo richiede alcuni mesi per stabilizzarsi ad un valore minimo. Se si considera che gli inerti possono permanere anche a lungo nelle aree di stoccaggio dell'impianto di produzione di conglomerato, e che la loro Energia superficiale è diretta responsabile della compatibilità adesiva col legante bituminoso, si comprende come sia necessario conoscere preventivamente lo stato delle effettive condizioni energetiche



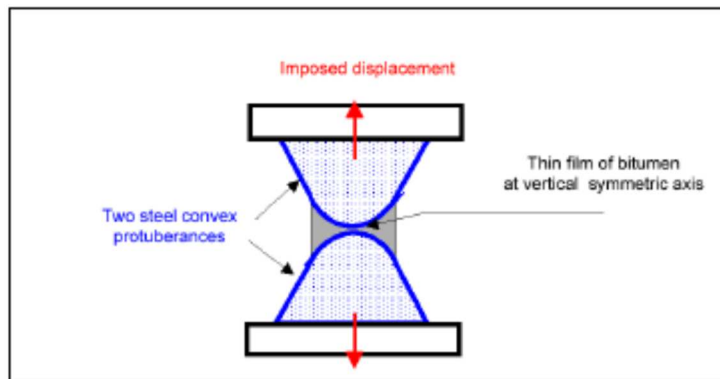
superficiali, per il confezionamento dei conglomerati a caldo. In base ai tempi di stoccaggio dei minerali dopo la loro frantumazione, ne conseguono differenti affinità polari con i leganti nel tempo. Jostein ha provato che l'attività superficiale degli aggregati è più spiccata subito dopo la loro frantumazione; dopo circa 120 giorni viene poi raggiunto un minimo valore di attività. Essendo l'adesione dipendente dall'attività superficiale degli aggregati, ne consegue che, tempi di stoccaggio differenti comportano differenti gradi di adesione per uno stesso tipo di minerale. Tale ultima affermazione è rilevante soprattutto con riferimento alla durabilità dei conglomerati bituminosi in opera. In conclusione, buona parte della resistenza meccanica del collegamento all'interfaccia tra strati bituminosi adiacenti sottoposti a compressione e taglio è legata all'adesione ed alla coesione sviluppata dai bitumi delle miscele componenti gli strati stessi, oltre ovviamente al loro ingranamento interno. In effetti, se si assume per ipotesi, che la resistenza del collegamento all'interfaccia tra gli strati, ossia il legame tra gli aggregati che sono a contatto ed appartengono ai due conglomerati adiacenti, sia infinita, ne consegue che, la resistenza alle azioni esterne del sistema bistrato, resta totalmente a carico di quella interna a ciascuno dei due conglomerati, ossia alle loro proprietà di ingranamento interno, di adesione bitume-inerti e di coesione. Ecco che, la rottura del sistema, non avverrà certo all'interfaccia, ma potrà manifestarsi in un punto od un piano qualsiasi all'interno dei due conglomerati di strato. Nella realtà, in genere, il collegamento all'interfaccia, in quanto discontinuità effettiva, rappresenta il punto debole del sistema e, pertanto, risulta con più probabilità, interessato da rottura. Tuttavia, le porzioni di conglomerato che si affacciano direttamente al contatto, per le quali la resistenza meccanica corrisponde all'incirca a quella del conglomerato di appartenenza, partecipano comunque alla resistenza del collegamento, fornendo ingranamento, adesione e coesione agli inerti a ridosso dell'interfaccia, ossia mantenendoli nella loro posizione originaria confinandoli sulla parte del loro contorno non a contatto con il conglomerato dell'altro strato.

## **2.2 Coesione**

Un'altra proprietà del bitume che conferisce resistenza al conglomerato di appartenenza, è la cosiddetta coesione. Essa rappresenta la capacità che il bitume ha, in termini di resistenza meccanica, di mantenere intatto il conglomerato bituminoso legando tra loro

gli elementi litici che lo formano. In altre parole, esprime il potere legante del bitume ipotizzando che esso sia perfettamente aderente agli aggregati che circonda ed è pertanto identificabile con la resistenza meccanica del legante stesso. La coesione pertanto è una proprietà che si riferisce esclusivamente al tipo di legante utilizzato e non, come nel caso dell'adesione, al sistema comprendente anche l'inerte. Sapendo che i materiali bituminosi presentano risposte differenti a seconda della temperatura a cui si trovano dalla velocità di applicazione dei carichi, è chiaro che questa proprietà sarà fortemente influenzata dalle modalità in cui il conglomerato si troverà ad operare. Le proprietà coesive di un legante bituminoso rivestono un ruolo chiave nella resistenza a fatica di una pavimentazione stradale che, come noto, è uno dei principali meccanismi di degrado, pertanto, la valutazione del comportamento a fatica si trova alla base dei comuni metodi di progettazione delle sovrastrutture.

Se andassimo ad analizzare da vicino carote estratte da pavimentazioni in cui si sono verificate rotture per fatica o provini sottoposti in laboratorio a prove di fatica osserveremo che le fratture nel conglomerato avvengono principalmente nel volume del film di bitume. Recenti sperimentazioni condotte negli ultimi anni presso il Laboratoire Central des Ponts et Chaussées di Parigi hanno evidenziato quanto detto e inoltre messo alla luce un ulteriore aspetto riscontrato che è quello dell'autoriparazione del bitume. Per simulare in laboratorio le rotture da fatica e il fenomeno dell'auto-riparazione di film sottili di bitume sotto carico ciclico, così come lo sono nella realtà all'interno del conglomerato bituminoso, è stato messo a punto il cosiddetto "Local Fracture Test on Bitumen", nel quale una lente di bitume viene colata su due elementi convessi metallici, che simulano due aggregati ravvicinati, lasciata solidificare e sottoposta a sforzi ciclici di trazione mono assiale. Questa prova, pur essendo condotta in laboratorio, risulta essere estremamente rappresentativi di ciò che accade all'interno del conglomerato bituminoso in esercizio, in corrispondenza della zona di contatto tra due aggregati. La figura 9 schematizza l'apparato a riposo, ovvero quando tra le superfici sferiche che simulano gli inerti, è presente un gap di alcuni decimi di millimetro alla temperatura di 0°C. Tale distanza non si discosta troppo da quella che effettivamente si può riscontrare tra gli aggregati di un conglomerato reale.



*Figura 10 schema dell'apparato Local Fracture Test*

Per quanto riguarda gli effetti della temperatura, altro parametro che influenza le proprietà coesive, si è visto che temperature più basse tendevano ad irrigidire il bitume favorendo la comparsa di cricche e fessure come era facile aspettarsi al contrario di temperature più elevate.

Infine, per quanto riguarda gli effetti della velocità di applicazione del carico dalle prove è emerso che carichi ciclici con frequenze elevate acceleravano la comparsa dei fenomeni di rottura per fatica con conseguente perdita di coesione.

Per studiare gli effetti del fenomeno di autoriparazione, si sono eseguiti diversi test nei quali sono stati applicati un certo numero di cicli di carico allo stesso campione, intervallati da periodi di riposo durante i quali il provino veniva riportato nelle condizioni di partenza. Si è osservato come la capacità di auto-riparazione del bitume dipenda sostanzialmente dalla durata del periodo di riposo e della temperatura al quale esso avviene.

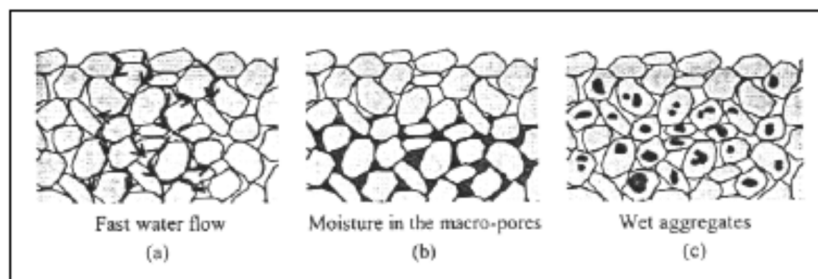
## **2.3 Danni causati dall'acqua**

In un conglomerato bituminoso l'interazione con l'acqua rappresenta la principale causa di dissesto della pavimentazione stradale. La miscela di un conglomerato deve la sua forza sia alla coesione proprie del bitume impiegato che all'adesione, ovvero ai legami che si instaurano tra il legante e gli aggregati. In condizioni di abbondanti precipitazioni e di traffico intenso, possono verificarsi sia il fenomeno dello spogliamento (stripping), cioè la perdita di adesione, che l'indebolimento della coesione. Il danno dell'acqua consiste nel progressivo deterioramento della pavimentazione bituminosa attraverso la

perdita di adesione tra bitume e aggregato e/o la perdita di coesione tra il bitume stesso a causa dell'infiltrazione dell'acqua. Questo è un fenomeno complesso che coinvolge caratteristiche termodinamiche, chimiche, fisiche sia dei bitumi che degli aggregati. L'umidità influisce quindi sulle microstrutture dei materiali, compromettendo così l'intero sistema. L'acqua può ridurre la coesione del conglomerato andando ad infiltrarsi all'interfaccia con l'aggregato, rompendo così il legame adesivo ed asportando il bitume dall'aggregato stesso. In questi modi si viene a generare una dislocazione dell'aggregato meglio nota come "stripping" o "spogliamento". Il fenomeno dello stripping può essere definito come la perdita di adesione causata dall'acqua con conseguente delaminazione del film di bitume dalla superficie dell'aggregato facente parte del conglomerato bituminoso. L'acqua può così infiltrarsi tra il film bituminoso e l'aggregato, rompere il legame di adesione che esiste tra i due e far sì che il conglomerato si 'spogli' dell'aggregato.

L'acqua può trovarsi all'interno di una pavimentazione stradale per diversi motivi:

- a) Precipitazioni atmosferiche che cadendo sulla superficie penetrano all'interno della porosità soprattutto nel caso di conglomerati bituminosi aperti meglio conosciuti come drenanti che vengono appositamente progettati per ridurre lo spessore del film idrico accumulato sulla superficie durante eventi piovosi intensi. Se la pavimentazione fosse correttamente progettata l'acqua dovrebbe solo transitare nei pori per poi essere allontanata al termine della precipitazione limitando il danneggiamento del conglomerato alla sola durata dell'evento meteorico
- b) Presenza di ristagni idrici nei macro-pori dovuti per esempio ad un errata scelta del diametro degli aggregati e della loro distribuzione granulometrica che comporta l'occlusione dei pori con conseguente intrappolamento dell'acqua che non riesce a fluire. Questo è un aspetto da evitare perché in presenza di traffico veicolare si viene a creare un'azione di pompaggio (pumping action) che manda in pressione l'acqua nei pori accelerando il processo di danneggiamento.
- c) L'acqua può trovarsi all'interno dei pori ancor prima della costruzione dello strato, per esempio, a causa di una errata procedura di essiccamento degli aggregati



*Figura 11 possibili metodi di infiltrazione dell'acqua in un conglomerato*

## 2.4 Il fenomeno dello spogliamento

Il fenomeno dello spogliamento meglio noto anche come “stripping è un meccanismo di danneggiamento causato dall'acqua che porta al progressivo indebolimento fino alla rottura del legame che si viene a istaurare tra bitume e aggregato. Nelle pavimentazioni stradali può causare danni molto rilevanti che possono portare al distacco anche di porzioni di conglomerato con conseguente ammaloramento dello stesso e quindi riduzione della vita utile.

Per cercare di spiegare questo fenomeno supponiamo di considera un aggregato interamente ricoperto da un fil di bitume privo dio fessure che si trova esposto ad un campo di umidità stazionario.

Dal momento che la porosità del bitume è praticamente nulla l'acqua potrà raggiungere l'interfaccia bitume aggregato solo attraverso un processo di diffusione molecolare che si realizza all'interno del film di bitume di rivestimento.

Quindi inizialmente è il solo la porzione esterna del film di bitume ad essere in contatto con l'acqua, lasciando asciutti sia l'interfaccia che l'aggregato; con il passare del tempo il gradiente di umidità si mantiene costante e le molecole d'acqua inizieranno progressivamente a diffondersi all'interno del film di bitume raggiungendo l'interfaccia. E chiaro che fintanto che il fenomeno resta localizzato in piccole zone non si verificano fenomeni di spogliamento ma all'aumentare della diffusione e del gradiente di concentrazione dell'umidità all'interno del film continuo di bitume, una significativa quantità di umidità può raggiungere l'interfaccia e produrre un progressivo spogliamento del bitume dall'aggregato come indicato in figura 12.

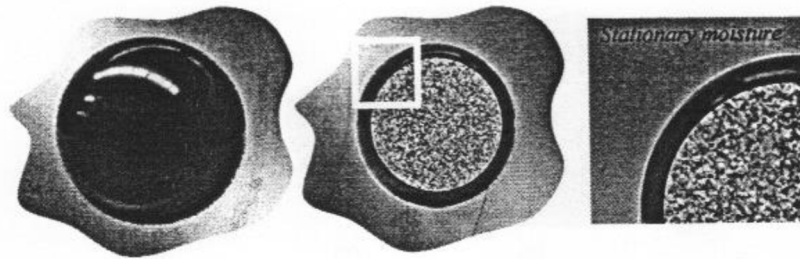


Figura 12 vista di un aggregato ricoperto da un film bituminoso

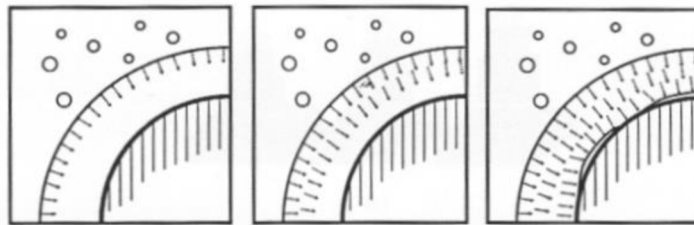


Figura 13 meccanismo di diffusione dell'umidità attraverso il film di bitume

## 2.5 Fattori che influenzano il danno dell'acqua

Come abbiamo visto il fenomeno dello spogliamento e più in generale il danneggiamento causato dall'acqua sono fenomeni molto complessi la cui evoluzione è regolata da molteplici fattori come le caratteristiche dei materiali, le condizioni ambientali, gli effetti di costruzione e drenaggio delle pavimentazioni ecc. In ogni caso il più importante tra i potenziali fattori influenti è la porosità, tessitura superficiale e affinità dell'aggregato con l'acqua che dominano la tensione dell'adesione tra aggregato e bitume. Anche gli aggregati deboli e fragili, con presenza di polveri degradazioni e caratterizzati da proprietà di bagnatura inadeguate, possono inoltre incidere sulla resistenza allo spogliamento. Per quanto riguarda le caratteristiche del bitume che concorrono alla formazione del fenomeno dello spogliamento, ad oggi, non sono ancora disponibili dati certi. Tuttavia, alcune ricerche hanno mostrato che un alto contenuto di bitume minimizza lo spogliamento nelle miscele, inoltre bitumi ad elevata viscosità

resistono maggiormente alla rimozione da parte dell'acqua rispetto quelli con minor viscosità. Ciò può essere spiegato dalla teoria meccanica e dell'orientamento molecolare dell'adesione.

Evidenze sperimentali hanno dimostrato che anche la presenza dei vuoti nelle pavimentazioni ed in particolare alla loro forma e dimensione concorre al fenomeno dello spogliamento.

È evidente che anche le condizioni ambientali in cui si trova esposta la pavimentazione possono essere possibili fattori che influenzano il danneggiamento indotto dall'acqua. Cicli di caldo e freddo associati a ristagni idrici dovuti per esempi alla presenza di canali o fossi al lato della pavimentazione possono causare fenomeni di spogliamento. Inoltre, le alte temperature accentuano questo fenomeno perché il bitume è più fluido e quindi risulta essere più facilmente rimovibile dall'aggregato, viceversa temperature molto basse fanno sì che il conglomerato sia molto rigido e quindi più soggetto a fessurazioni, prodotte dal traffico veicolare, che aprono vie di ingresso preferenziali per l'acqua.

Come ultimo fattore di influenza, ma non di minore importanza, viene inserita la procedura di costruzione delle pavimentazioni e in modo specifico la compattazione. Sebbene molte sovrastrutture vengano progettate con vuoti tra il 4,5% ed il 7,5%, esse vengono usualmente realizzate in cantiere con un maggiore contenuto di vuoti (circa tra 8% e 10%) concorde alla densità residua minima accettata in sito. Questo perché si ipotizza che l'azione del traffico veicolare possa indurre un'ulteriore azione di compattazione in grado di riportare i vuoti intorno alle percentuali di progetto. Pavimentazioni così costruite possono ricadere nel range di vuoti "pessimi" e quindi sperimentare la peggiore prestazione nei riguardi dello spogliamento (Kandhal, 1992; Terrel e Al-Swailmi, 1993).

Anche l'azione meccanica della rullatura in sé può causare delle micro-fessure del fil bituminoso che possono fungere da passaggi per l'acqua con conseguenti problemi di spogliamento (Mohamed, 1993).

## **2.6 Prove per la misura delle proprietà di adesione in presenza di acqua**

Secondo il testo “Shell Bitument Handbook” (2003), le prove disponibili per caratterizzare le proprietà di adesione di un sistema bitume aggerato condizionato dalla presenza di acqua, sono riportate di seguito.

### *2.6.1 Prove di immersione statiche.*

Si tratta del tipo di prove più semplice e consiste nel rivestire l’aggregato di bitume e poi immergerlo in acqua. Il problema principale di questo metodo è che ha una scarsa ripetibilità, in quanto completamente dipendente dall’operatore che esegue la prova. Inoltre, va notato che un aggregato con buone prestazioni di laboratorio potrebbe avere scarse prestazioni in alcune occasioni, mentre quelli con risultati scarsi ai test di immersione statica, potrebbero nella pratica presentare prestazioni soddisfacenti. Un esempio di prova di immersione statica è costituito dal “British Standard EN 13614:2011, Bitumen and bituminous binders. Determination of adhesively of bituminous emulsions by water immersion test.”

### *2.6.2 Prove di immersione dinamiche*

Questo tipo di prova è molto simile al test di immersione statica, con la sola differenza che il campione viene agitato meccanicamente tramite scuotimento. Il grado di stripping (perdita di adesione tra le superfici di aggregato e bitume) viene stimato visivamente e la ripetibilità è molto scarsa, in quanto il test è fortemente dipendente dall’operatore che lo esegue. Un esempio di prova di immersione dinamica è il “British Standard EN 12274-7:2005 Slurry surfacing. Test methods. Shaking abrasion test.”

### *2.6.3 Prove di immersione chimiche*

In questo tipo di prova, gli aggregati rivestiti di bitume vengono fatti bollire in soluzioni contenenti varie concentrazioni di carbonato di sodio. La forza della soluzione di carbonato di sodio nella quale si osserva il fenomeno di stripping è usata come misura dell’adesione. Tuttavia, la condizione artificiale del test non si presta ottimamente a prevedere la prestazione realistica su strada. Un esempio di prova di immersione



chimica è la “TMH1-Method B11- The determination of Adhesion of Bituminous Binder to Stone Aggregate by means of the Chemical Immersion test, conosciuta anche come il test di Riedel & Weber.”

#### *2.6.4 Prove di rivestimento*

Questo tipo di test intende valutare l'adesione tra aggregato e bitume in presenza di acqua. Nell' “Immersion Tray Test della British Road Note 39” (Roberts & Nicolls, 2008), trucioli di aggregato, ricoperti da un sottile strato d'acqua, si inseriscono in un contenitore di bitume. Con un attento esame dei trucioli, è possibile determinare se gli agenti tensioattivi migliorano l'adesione in condizioni bagnate.

#### *2.6.5 Prove di assorbimento*

Come parte del “Strategic Highways Research Program” (SHRP) degli Stati Uniti, il metodo di prova di assorbimento netto fu sviluppato per valutare il danno dell'umidità negli asfalti (Curtis et al., 1993). Questo test è estremamente complicato e richiede uno spettrofotometro (non facile da procurare) per effettuare la misurazione

#### *2.6.6 Prove di impatto*

Il test col pendolo Vialit e il test con la piastra Vialit sono generalmente gli unici due test a disposizione per misurare l'adesione bitume-aggregato con prove di impatto. Entrambi i metodi sono adattabili a una vasta gamma di condizioni al contorno. I test sono adatti a situazioni in cui l'aggregato è in contatto diretto con sollecitazioni di traffico (tappeto d'usura). La prova del pendolo Vialit prevede il posizionamento di un film sottile di legante tra due cubi, misurando quindi l'energia necessaria per rimuovere il cubo superiore. La prova della piastra Vialit è impiegata per stimare l'adesività degli aggregati al bitume. Questo metodo viene adottato per esaminare gli aggregati da impiegare sui trattamenti superficiali stradali. L'apparecchiatura è composta da un basamento metallico con tre punte verticali di sostegno della piastra di prova, da un'asta verticale di 50 cm con scivolo all'estremità superiore per la caduta di una biglia d'acciaio, da una biglia d'acciaio da 512 g, da una dotazione di 6 piastre metalliche di prova e da un apposito cilindro metallico di rullatura del campione rivestito di gomma dura. La piastra di prova, una volta rivestita di bitume su una faccia e cosparsa della

graniglia in esame, viene rullata dal cilindro metallico e successivamente posizionata sul sostegno a tre punte del basamento. Si fa cadere la biglia metallica dallo scivolo per tre volte, poi si conteggiano e si esaminano le pietre che si sono scollate dal supporto di bitume.

### *2.6.7 Prove di estrazione (pull-off tests)*

Nell'ambito delle prove di estrazione, il "Forum of European National Highway Research Laboratories" (2004) indica lo strumento di trazione pneumatica PATTI (Pneumatic Adhesion Tensile Testing Instrument) come possibile tester di adesione. Questo metodo è stato originariamente sviluppato per testare la forza di estrazione di un rivestimento su substrati rigidi quali metallo, calcestruzzo, come da ASTM D 4541-02. È stato impiegato già dalla metà del 1990 per valutare la perdita di adesione di sistemi con leganti bituminosi esposti all'acqua (Youtcheff & Aurilio, 1999).

Questa apparecchiatura sostanzialmente ci permette di valutare la forza necessaria per staccare un pistoncino metallico da un supporto a cui viene incollato con il legante che si intende testare. Tramite un'elaborazione di valori di pressione occorsi in fase di rottura associata ad un'analisi visiva della superficie di rottura stessa è possibile valutare le proprietà di adesione /coesione del legante sul supporto.

Tutti i dettagli di questa prova verranno trattati in maniera approfondita nel prossimo capitolo.

## **3 INDAGINE SPERIMENTALE**

### **3.1 OBIETTIVI DELL'INDAGINE SPERIMENTALE**

In questo capitolo verrà descritta in maniera dettagliata la sperimentazione condotta presso il Laboratorio di Strade del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura (DICEA) situato presso l'Università Politecnica delle Marche.

L'obiettivo di questa indagine ha riguardato la possibilità di impiegare, nel confezionamento dei conglomerati bituminosi utilizzati in campo stradale, nuovi aggregati e leganti ecosostenibili.

Per quanto riguarda gli aggregati si è valutata la possibilità di utilizzare nelle miscele, inerti provenienti da scarti di lavorazioni industriali che nel caso specifico sono costituiti da scorie d'altoforno elettrico EAF (Electric Arc Furnace) e resine catalizzate provenienti da processi di lavorazione di lavelli e piani da cucina realizzati in materiale sintetico. Verranno quindi analizzate le performance di questi nuovi materiali in termini di adesione e coesione che poi saranno confrontate con quelle misurate su alcuni aggregati che oggi vengono comunemente impiegati in campo stradale, che nel caso specifico, saranno il calcare e il basalto entrambi testati sia in condizione vergine, ovvero di primo impiego, che in condizioni pre-bitumate ovvero configurati in modo da simulare inerti provenienti dalla demolizione e riciclo di vecchie pavimentazioni stradali.

Su fronte dei leganti, invece, verranno studiate le proprietà di adesione/coesione esibite da bitumi modificati sia con compound (polimerici ed al grafene), che con lignina di origine vegetale che poi verranno confrontate con quelle sviluppate dai bitumi oggi comunemente disponibili in commercio.

Questo aspetto ci permette di indagare una tematica oggi poco presa in considerazione in campo stradale ovvero quelle della sostenibilità ambientale sia in termini di consumo di materie prime che in termini di inquinamento ambientale.

Infatti, come è ormai noto, le riserve di idrocarburi non sono illimitate e pertanto bisogna impegnarsi a trovare soluzioni alternative per la realizzazione dei leganti in campo stradale ricorrendo il meno possibile agli idrocarburi e privilegiando soluzioni ecocompatibili.

Analogamente anche la tematica riciclo riveste un aspetto molto importante, infatti, la possibilità di riutilizzare e trovare una nuova collocazione a materiali di scarto provenienti da attività industriali da un lato ci permette di ridurre il consumo di materie prime e dall'altro di limitare l'inquinamento connesso allo smaltimento di questi materiali che verrebbero considerati rifiuti da smaltire in discarica ottenendo in entrambi i casi notevoli vantaggi in termini ambientali.

## 3.2 I MATERIALI

### 3.2.1 I leganti

#### 3.2.1.1 Tipi di leganti impiegati

In questa sperimentazione sono stati utilizzati sia leganti bituminosi tradizionali disponibili oggi in commercio che bitumi modificati con compound che con lignina. In occasione della preparazione dei provini a ciascun bitume è stata assegnata una lettera secondo la nomenclatura indicata di seguito.

- BB bitume base modifica 50/70 (utilizzato nelle modifiche con i compound)
- BB+PC bitume modificato in laboratorio con il 3% di compound superplast,
- BB+GC bitume modificato in laboratorio con il 3% di compound al grafene,
- H bitume SBS Hard 45/80-70. Bitume modificato in impianto,
- S bitume 70/100 modificato con lignina tipo “S”,
- B bitume 100/150 modificato con lignina tipo “B”,
- M bitume 100/150 modificato con lignina tipo “M”,
- N bitume base modifica 70/100,
- O bitume base modifica 100/150,
- Q bitume base modifica 50/70 (utilizzato nelle modifiche con lignina)
- R bitume SBS Hard modificato con lignina,
- T bitume SBS Hard base non invecchiato

○ I bitumi modificati “BB+PC” e BB+GC” sono stati ottenuti in laboratorio aggiungendo al bitume base “BB” rispettivamente il 3% di compound superplast e il 3% di compound al grafene.

Il bitume base BB utilizzato come base modifica è classificato come 50/70 ovvero con penetrazione a 25°C compresa tra 50 e 70 mm. Tale legante è stato prodotto dalla raffineria API di Ancona nello stabilimento di Falconara Marittima.

La tabella riportata in figura 14, in accordo con la norma UNI EN 12591, riassume le caratteristiche di questo bitume.

	Unità	Metodo di prova	Designazione delle classi								
			20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
Valore della penetrazione a 25 °C	× 0,1 mm	EN 1426	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220	250-330
Punto di ramollimento	°C	EN 1427	55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43	30-38
Resistenza all'indurimento, a 163 °C <sup>a)</sup>		EN 12607-1 o EN 12607-3									
- variazione di massa, massimo, ±	%		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1,0	1,0
- penetrazione residua, minimo	%		55	53	53	50	50	46	43	37	35
- punto di ramollimento dopo indurimento, valore minimo	°C	EN 1427	57	54	52	49	48	45	41	37	32
Punto di infiammabilità, valore minimo	°C	EN 22592 (b)	240	240	240	230	230	230	230	220	220
Solubilità, valore minimo	% (m/m)	EN 12592	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0

a) In casi di arbitrato deve essere utilizzato solo il metodo RTFOT (b) Vedere 4.1.1.3.

Classi	20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/200	250/330
Viscosità dinamica	440	260	225	175	200	120	80	43	18

a 60°C  
EN 12595

Figura 14 caratteristiche bitume 50/70

I compound polimerici utilizzati per eseguire le modifiche sono stati prodotti da una azienda italiana e di essi sono note le caratteristiche fisico chimiche. Volendo, però, dare una descrizione qualitativa, questi due materiali si presentano particolarmente duri al tatto, non scalfibili con l'unghia, assimilabili ad una caramella di liquirizia anche in termini di dimensioni: il diametro non supera i 5mm.



Figura 15 compound superplast a destra ed al grafene a sinistra

○ Il bitume denominato con la sigla “S”, è stato ottenuto in laboratorio sostituendo il 30% del legante 70/100 con lignina di tipo “S” Questo bitume verrà indicato, in sede di analisi dei risultati, come 70/100 +30% “S”. I bitumi “B” ed “M” sono stati realizzati in laboratorio sostituendo il 30% del bitume base 100/150 rispettivamente con lignina di tipo “B” ed “M”. In fase di analisi, suddetti bitumi, verranno indicati con la sigla 100/150 + 30% “B” e 100/150 + 30” M”.

○ Il bitume “R” è stato ottenuto sostituendo il 10% del legante di tipo “T” con lignina di tipo “S” e verrà codificato in questo modo SBS Hard + 10% “S”.

Tutti i bitumi impiegati insieme alle lignine, siano essi base che modificati, sono stati sottoposti ad una serie di prove di laboratorio da cui è stato possibile ricavare le caratteristiche in termini di penetrazione temperatura di palla anello e viscosità alla temperatura di 160 °C che troviamo riassunte nella tabella 16.

Tipo di bitume	Penetrazione a 25°C (mm)	Temp. di palla anello (°C)	Viscosità a 160°C (Pa*s)
50/70	47.9	51.5	0.116
70/100	78.4	48.0	0.117
100/150	98.6	45.9	-
70/100 +30% “S”	58.8	50.8	0.423
100/150 +30 % “B”	57.4	50.8	0.338
100/150 +30% “M”	65.8	50.2	0.225
SBS Hard	43.6	77.4	0.401
SBS Hard +10% “S”	40.5	78.0	0.578

*Tabella 16 caratteristiche bitumi impiegati in occasione delle prove con le lignine*

Per quanto riguarda le lignine denominate “S”,” B” ed “M” queste sono state inizialmente essiccate in forno alla temperatura di 105°C per far evaporare il contenuto in acque che è risultato essere pari a circa il 50% del peso iniziale, quindi, sono state sbriciolate a mano in quanto la loro consistenza era di tipo grumoso.

Il materiale così ottenuto è stato poi inserito in sostituzione del bitume secondo le percentuali indicate sopra e miscelato con miscelatore ad alto taglio con velocità di 5000 rpm per 40 minuti circa.

Di seguito sono riportati alcuni estratti delle schede tecniche fornite dal produttore delle lignine.

- Lignina tipo “B”

9.1 Odor (odor threshold):	
9.2 Ignition temperature:	195 °C [16.1]
9.3 Self-ignition temperature	425 °C [16.1]
9.4 Smoldering temperature	185 °C [16.1]
9.5 Lower concentration limit of flame spread	40 g/m <sup>3</sup> [16.4]
9.6 Maximum explosion pressure	710 kPa [16.4]
9.7 Minimum ignition energy	20 mJ [16.4]
9.8 Density:	1.25-1.45 g/cm <sup>3</sup> [16.2]

Figura 37 caratteristiche della lignina “B”

- Lignina tipo “M”

Information on basic physical and chemical properties

Appearance	Powder
Odour	Aromatic odour, slightly sulphurous
Odour threshold	Not determined.
pH	???
Melting point	Not applicable
Initial boiling point and boiling range	Not determined
Flash point	Not determined
Evaporation rate	Not applicable
Flammability (solid, gas)	
Vapour pressure	Not applicable
Vapour density	Not applicable
Bulk density	Not determined
Solubility	Soluble in water in alkaline conditions
Partition coefficient: n-octanol/water	Not determined
Dust explosion characteristics	
Dust layer ignition	
Decomposition temperature	200 °C
Viscosity	Not applicable
Explosive properties	The powder can create an explosive powder air mix
Oxidising properties	Not oxidizing

Tabella 18 caratteristiche della lignina “M”



- Lignina tipo “S”

## Material Safety Data Sheet

### SECTION 1: IDENTIFICATION OF THE SUBSTANCE/MIXTURE

**Manufacturer’s Name:** SEKAB E-technology

Manufacturer’s Address: Horneborgsvagen 12, SE-892 50 Domsjo,

Sweden **Product Name:** Lignin from thermochemical- and enzymatic

treatment of wood **Common Name and Synonyms:** N/A **Chemical**

**Family:** N/A

**CAS Number:** N/A

**Chemical Formula:**

N/A

**Preparation Date:** 2021-01

**Reportable Quantity:** approx. 10-20 kg

### SECTION 2: PHYSICAL AND CHEMICAL DATA

**Physical property:** solid

**Freezing point:** -5 to 0 °C

**Moisture content:** 50-60v

**color:** Dark

### SECTION 3: HAZARDOUS INGREDIENTS

**This material is the solid residue from thermochemical- and enzymatic treatment of wood.**

#### Table of hazardous ingredients in the liquid phase of the material

Compound	Amount (w-%)
Acetic acid	<2
Furfural	<0,2
Hydroxymethylfurfural	<0,2



Figura 19 lignine prima dell'essiccamento in forno a sinistra e dopo la macinatura a destra

o il bitume SBS HARD 45/80-70 e un bitume modificato in stabilimento che è stato fornito dalla ditta Pavimental S.p.a. ed è stato prelevato dall'impianto sito in località Leonessa, 60025, Loreto (AN).

Di seguito vengono riportate le sue principali caratteristiche:

*Bitume modificato da polimeri 45/80 - 70*

Consistenza alla temperatura di servizio intermedia (penetrazione a 25 °C)	Classe 4
Consistenza alla temperatura di servizio alta (punto di rammollimento)	Classe 4
Coesione (duttilità)	Classe 2
Resistenza all'invecchiamento	-
Penetrazione residua a 25°C	Classe 3
Incremento del punto di rammollimento	Classe 2
Variazione di massa	Classe 4
Recupero elastico a 25 °C	Classe 2
Sostanze pericolose regolamentate	assenti

Tabella 20 caratteristiche del bitume SBS

### 3.2.1.2 Temperature di impiego

Come è noto il bitume è un materiale termo-dipendente ovvero che modifica le sue proprietà in relazione alla temperatura a cui è sottoposto per cui nel nostro caso avendo a che fare con diversi tipi di bitumi si è proceduto preliminarmente a determinare le temperature a cui tutti i leganti presentano la stessa viscosità che troviamo riassunte nella tabella sottostante.

<i>Tipo di bitume</i>	<i>Temp. (°C)</i>
<b>BB</b>	<b>135</b>
<b>BB+PC</b>	<b>145</b>
<b>BB+GC</b>	<b>145</b>
<b>H</b>	<b>160</b>
<b>S</b>	<b>160</b>
<b>B</b>	<b>154</b>
<b>M</b>	<b>143</b>
<b>N</b>	<b>133</b>
<b>O</b>	<b>116</b>
<b>Q</b>	<b>132</b>
<b>R</b>	<b>162</b>
<b>T</b>	<b>160</b>

*Tabella 21 temperature di impiego dei bitumi*

### 3.2.2 *Gli aggregati*

#### 3.2.2.1 *Aggregati vergine*

Gli aggregati tradizionali (calcare e basalto) impiegati sono costituiti da dischetti di diametro di 10 cm e spessori di circa 1 cm ottenuti eseguendo una perforazione con una carotatrice sul materiale base e successivamente andando a tagliare la carota ottenuta con una sega a disco diamantata raffreddata ad acqua avendo cura di ottenere delle superfici di taglio il più possibile regolari.

Le due immagini sottostanti mostrano i dischetti di calcare (a destra) e di basalto (a sinistra) utilizzati nell'ambito della sperimentazione.



*Figura 22 dischetti di calcare a destra e di basalto a sinistra*

#### 3.2.2.2 *Aggregati da riciclo - scorie*

Nel nostro caso sono stati utilizzate scorie provenienti da altoforni eterici, i provini di scoria sono stati ottenuti in maniera analoga a quanto illustrato per gli aggregati di calcare e basalto ovvero andando a tagliare dei dischi di circa un cm di spessore da delle carote di diametro 100 mm precedentemente realizzate su blocchi di materiale solido prelevati prima del processo di frantumazione.

Da notare la grande porosità del materiale che si viene a formare durante il processo di raffermamento che è molto rapido e agevolato mediante l'irrorazione di acqua nebulizzata.

In fase di preparazione dei provini su è cercato di incollare i pull stub in tutte quelle zone prive o comunque con ridotta porosità per evitare che il bitume, finendo nelle cavità, vada ad alterare i risultati della prova



*Figura 23 campione di scoria di circa 10 cm*



*Figura 24 dischetto di scoria diametro 10 cm*

### 3.2.2.3 Aggregati da riciclo – resine industriali di scarto

I supporti in resina utilizzati in questa sperimentazione sono scarti di lavorazioni industriali ottenuti durante le fasi di produzione di lavelli e piani da cucina; essi e si presentano sottoforma di “tavolette” di forma irregolare aventi dimensioni di 15-20 cm di lato e circa 1 cm di spessore, aventi anche diverse finiture superficiali in particolare una chiara leggermente più ruvida al tatto e una scura più liscia.

Tali materiali sono stati forniti dalla ditta Plados sita in via Grazia Deledda in località Montecassiano (MC).

Il materiale ha una consistenza rigida nonostante il ridotto spessore, non si scalfisce in superficie e risulta essere impermeabile all’acqua.



*Figura 25 provini di resina chiara a destra e di resina scura a sinistra*

Per valutare l’influenza della temperatura su questi materiali si è deciso di riscaldarli progressivamente fino alla temperatura di 160 °C, che poi verrà utilizzata in seguito per le prove, andando a osservare eventuali alterazioni della forma o la comparsa di difetti.

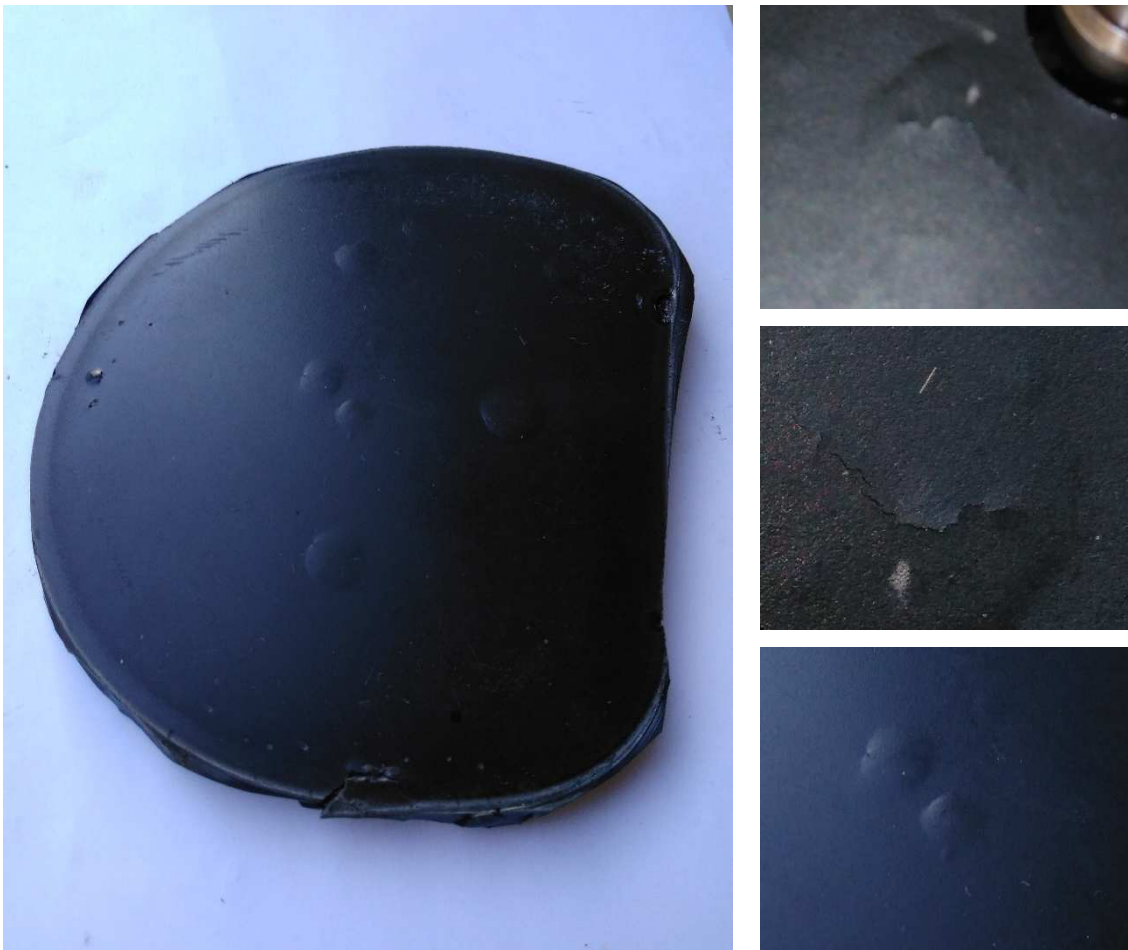
In particolare, si è visto che fino alla temperatura di 100°C su entrambi i supporti non sono state osservate variazioni di rilievo mentre per temperature superiori si è riscontrato un leggero rammollimento di entrambi i provini con la formazione di bolle e piccole crepe sui supporti di resina scura come si può osservare nelle immagini di figura

26

Inoltre, sono state riscontrate delle variazioni di planarità dei pezzi in assenza di carichi esterni o sollecitazioni applicati soprattutto per le resine scure che si sono leggermente incurvate verso l'alto.

In ultima analisi si è visto che il riscaldamento ad alte temperature ha prodotto anche odore acre un leggero accenno di fumo all'interno del forno impiegato per il riscaldamento

Nonostante la comparsa di questi danni, il materiale comunque non degrada e permette comunque l'esecuzione delle prove.



*Figura 26 danni provocati dalla temperatura sui provini di resina*

Di seguito si riporta un estratto del rapporto di prova eseguito dal laboratorio Analisi Control sito in via della meccanica,1 Corridonia (MC) sulla resina impiegata per il confezionamento dei lavelli e dei piani da cucina da parte della ditta Plados.

I questi campioni la resina costituisce il legante e mentre la fase solida è formata da granuli di materiale inerte probabilmente di origine silicea.

Segue rapporto di prova: 20211121-002

Mod. 17/A - rev. 7 del 21/10/2020

Prova Metodo	Risultato	Unità di misura	Limiti			U (K, P)	LQ
			A	B	C Rif.		
<b>Solfati</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 10304-1:2009	< LQ	mg/l SO <sub>4</sub>			250   ①		15
<b>Cloruri</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 10304-1:2009	< LQ	mg/l Cl			100   ①		15
<b>Bario</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 11885:2009	< LQ	mg/l Ba			1,0   ①		0,01
<b>Rame</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 11885:2009	< LQ	mg/l Cu			0,05   ①		0,01
<b>Zinco</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 11885:2009	< LQ	mg/l Zn			3   ①		0,1
<b>Berillio</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 11885:2009	< LQ	µg/l Be			10   ①		1
<b>Cobalto</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 11885:2009	< LQ	µg/l Co			250   ①		5
<b>Nichel</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 11885:2009	1	µg/l Ni			10   ①		1
<b>Vanadio</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 11885:2009	< LQ	µg/l V			250   ①		10
<b>Arsenico</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 11885:2009	< LQ	µg/l As			50   ①		5
<b>Cadmio</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 11885:2009	< LQ	µg/l Cd			5   ①		1
<b>Cromo totale</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 11885:2009	< LQ	µg/l Cr			50   ①		5
<b>Piombo</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 11885:2009	< LQ	µg/l Pb			50   ①		5
<b>Selenio</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 11885:2009	< LQ	µg/l Se			10   ①		5
<b>Mercurio</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 11885:2009	< LQ	µg/l Hg			1   ①		1
<b>Amianto</b> UNI EN 12457-2:2004 + MOCF	Assente	Ass./Pres.					
<b>COD</b> UNI EN 12457-2:2004 + ISPRA 5135 Man 117 2014	28	mg/l			30   ①	± 4	10
<b>pH</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN ISO 10523:2012	7,5	unità di pH			5,5-12,0   ①		
<b>Conducibilità elettrica</b> UNI EN 12457-2:2004 + UNI EN 27888:1995	30	µS/cm a 20°C					20

**RIFERIMENTI LIMITI:**

① D.M. 05/02/1998 - Supp. Ordinario n. 72 - GU n. 88 del 16/04/1998 e ss.mm.ii. all. 3

Legenda limiti: A: Concentrazione Limite; C: Limite Massimo

Legenda: U = Incertezza di Misura Estesa; K = Fattore di copertura = 2; P = Livello di probabilità = 95%; LQ = Limite di quantificazione;  
Campionamento NON eseguito dal Personale del Laboratorio Analisi Control S.r.l.

Il presente rapporto di prova si riferisce esclusivamente al campione sottoposto a prova. Il presente rapporto di prova non può essere riprodotto neanche parzialmente salvo approvazione scritta del Responsabile di Laboratorio.

2/3

Analisi Control S.r.l. - Via della Meccanica, 1 - 62014 CORRIDONIA (MC)  
Tel. 0733281989  
www.analiscicontrol.it - e-mail: analiscicontrol@analiscicontrol.it - info@pec.analiscicontrol.it

C.F. e P.I. 01019440435  
Cap. Soc. € 30.987,00  
Iscriz. Trib. MC R.S. n. 7828

Figura 27 composizione resina impiegata per il confezionamento dei lavelli e piani da cucina



#### 3.2.2.4 Aggregati pre-bitumati

Gli aggregati pre-bitumati sono stati realizzati artificialmente in laboratorio in modo da simulare il fresato stradale ovvero il materiale proveniente dalla demolizione di vecchie pavimentazioni stradali. La preparazione di questi supporti è stata eseguita andando ad applicare su una faccia del disco di aggregato, precedentemente riscaldato a 160°C per 2 ore, una quantità di bitume SBS Hard, anche esso riscaldato alla medesima temperatura, tale da garantire uno spessore del film di ricoprimento uniforme di circa 9.5 µm.

Per raggiungere questo spessore si è proceduto in questo modo.

Per prima cosa note le dimensioni del disco di aggregato che ricordiamo essere pari a 10 cm si è proceduto a calcolare il volume di bitume necessario per ottenere lo spessore richiesto semplicemente moltiplicando l'area del disco di aggregato per lo spessore di 9.5 µm ottenendo:

$$\frac{\pi * 10^2}{4} * 9.5 * 10^{-4} = 0.07461 \text{ cm}^3$$

Ipotizzando un peso specifico de bitume di 2.4 g/cm<sup>3</sup> è stato possibile ricavare il peso del quantitativo di bitume da applicare ovvero:

$$0.07461 * 2.4 = 0.1791 \sim 0.18 \text{ g}$$

Quindi si è proceduto a pesare l'aggregato vergine con una bilancia di precisione dopodiché è stato spalmato con un pennello il bitume ed infine è stato ripesato nuovamente l'aggregato andando a controllare che fosse stato applicato esattamente il quantitativo di bitume previsto.

Con questo approccio non si è tenuto conto della porosità superficiale dell'aggregato.

Il trattamento superficiale è stato riservato solo agli aggregati di calcare e di basalto.

Infine, si è proceduto all'invecchiamento degli aggregati precedentemente trattati mettendoli in forno inizialmente a 135°C per 4 ore e successivamente a 85°C per ulteriori 120 ore (5giorni) in accordo con quanto previsto dalla normativa AASHTO Standard R30.

### 3.3 IL PROGRAMMA SPERIMENTALE

In questo studio vengono analizzati sia aggregati tradizionali comunemente impiegati in campo stradale che aggregati provenienti dal riciclo di scarti di lavorazioni industriali. Per quanto riguarda i bitumi, sono stati utilizzati sia leganti modificati con compound e lignine che bitumi non modificati. Il programma sperimentale si articola in tre fasi

#### 3.3.1 Fase 1 - Leganti modificati con compound

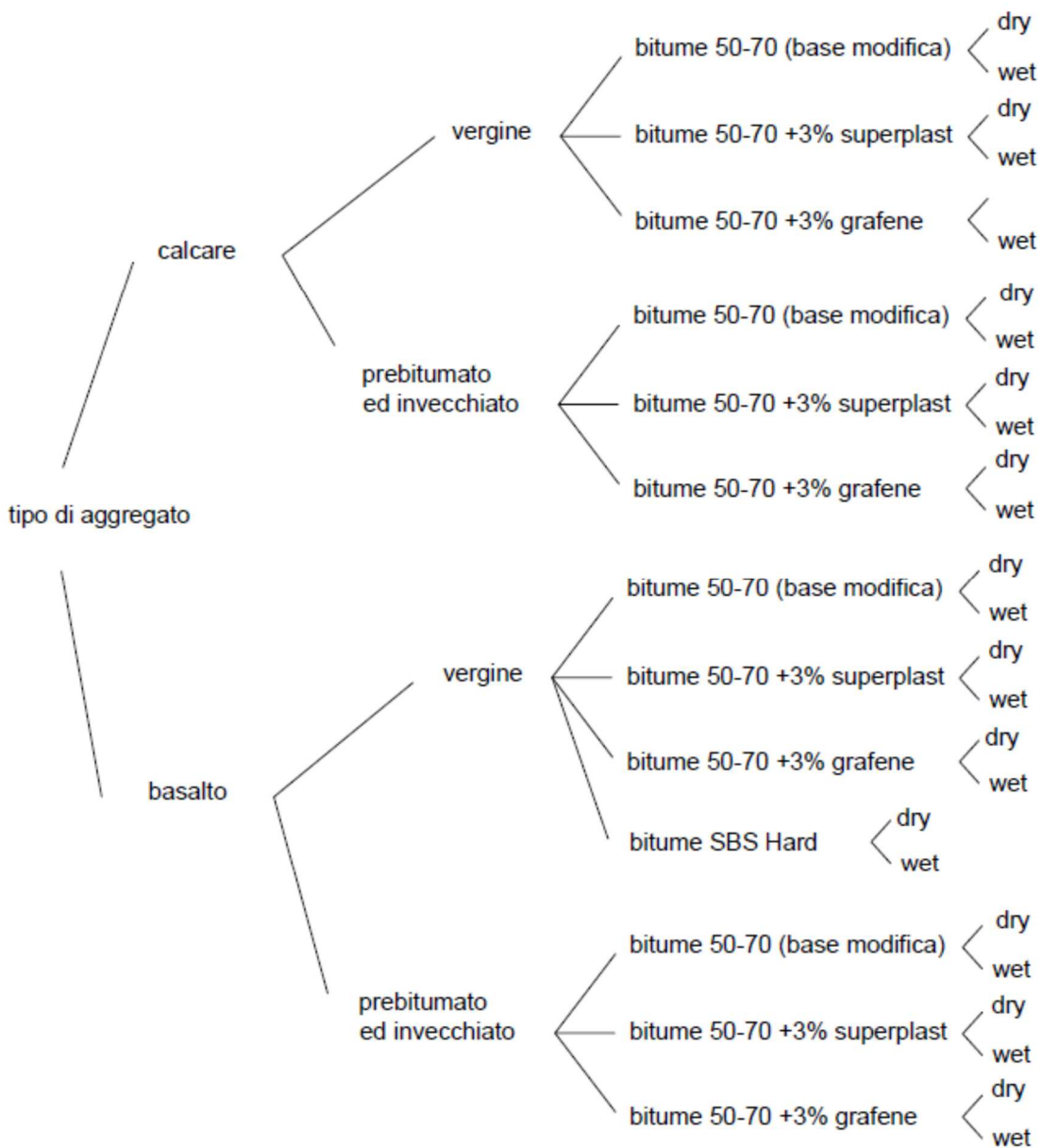


Figura 28 programma sperimentale su aggregati tradizionali vergini e bitumi modificati con compound

In questa prima fase del programma sperimentale sono stati presi in considerazione due bitumi modificati, uno con i compound polimerici e l'altro con compound al grafene.

Gli aggregati utilizzati sono stati calcare e basalto sia di tipo vergine che pre-bitumato in modo da simulare le condizioni in cui si viene a trovare il conglomerato bituminoso di recupero.

I risultati ottenuti saranno confrontati con quelli raggiunti dal bitume base 50/70 da cui sono stati ottenuti i due modificati.

### 3.3.2 Fase 2 - Scorie d'altoforno e resine industriali di scarto

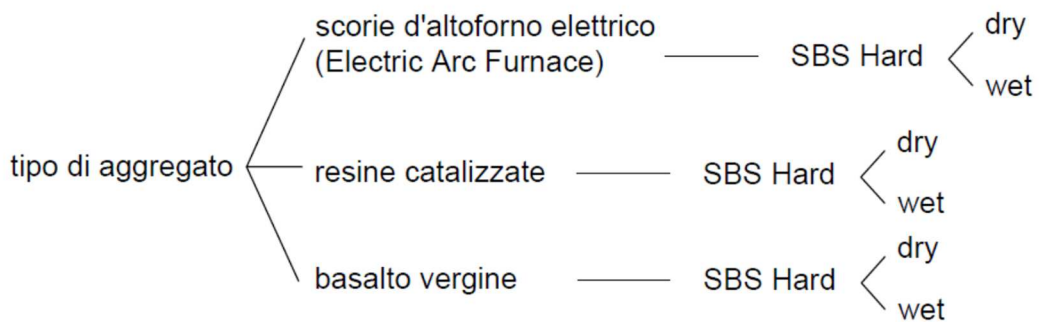


Figura 29 programma sperimentale su aggregati da riciclo

In questa seconda fase del programma sperimentale sono stati studiati aggregati di riciclo innovativi costituiti da scorie d'altoforno elettrico EAF (electric arc furnace) e resine industriali di scarto catalizzate. Tutti i materiali verranno testati facendo riferimento esclusivamente al bitume SBS Hard 45-80/70.

Per avere un riferimento del livello di adesione raggiunto da questo bitume saranno presi in considerazione anche aggregati tradizionali di basalto vergine.

3.3.3 Fase 3 - Leganti modificati con lignine di tipo "S", "B", "M"

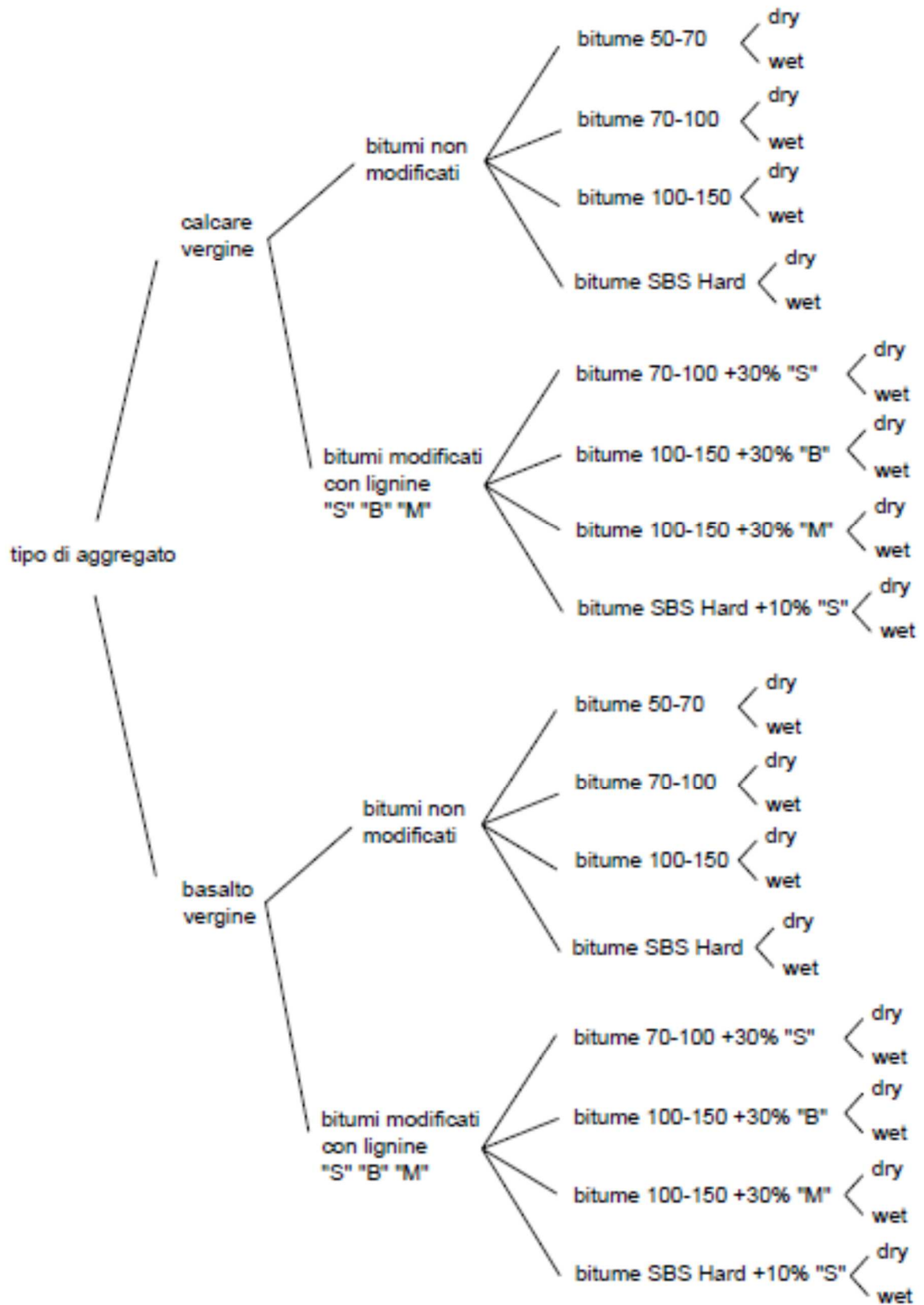


Figura 30 programma sperimentale su aggregati tradizionali vergini e bitumi modificato con lignina

Nella terza fase del programma sperimentale sono stati presi in esame i leganti modificati con lignina.

Nello specifico sono state utilizzate tre tipi di lignine contrassegnate con le lettere “S”, “B”, “M” in accordo con quanto riportato al paragrafo 2.1.1 e otto tipi di bitume di cui quattro non modificati ovvero 50/70, 70/100, 100/150, SBS hard e quattro modificati con lignina 70/100+30% “S” ,100/150 + 30% “B” ,100/150 +30% “M”, SBS Hard + 10% “S”. Gli aggregati in questo caso saranno solo quelli di calcare e basalto vergini.

Per quanto riguarda il condizionamento in tutte e tre le fasi si farà riferimento alle seguenti due condizioni:

- Condizione “dry” in cui i provini vengono posti in camera climatica per 24 ore a 25°C,
- Condizione “wet” in cui i provini vengono prima inseriti in bagno termostatico per 24 ore a 40°C e poi in camera climatica per 90 minuti a 25°C.

## **3.4 LA PROVA BBS**

### *3.4.1 Generalità sulla prova*

BBS è l’acronimo di Bitumen Bond Strength e sono delle prove che permettono di valutare le proprietà adesive/coesive di sistemi bitume-aggregato.

Esse consentono di misurare la resistenza a trazione del legame tra bitume e un substrato solido, mediante l’applicazione di una forza di trazione crescente linearmente fino al raggiungimento della condizione di rottura (pull-off) su appositi pistoncini incollati al substrato attraverso un prefissato quantitativo di bitume pari a 0.08 grammi.

Tali prove sono normate secondo la AASHTO TP-91 e vengono eseguite tramite uno strumento denominato PATTI, (Pneumatic Adhesion Tensile Testing Instrument), messo a punto dall’Istituto Nazionale degli Standards e delle Tecnologie americano NIST (National Institute of Standards and Technology).

Inizialmente questo strumento veniva utilizzato per misurare l'adesione delle vernici ai supporti e successivamente è stato modificato da Youtcheff nel 1997, per valutare la perdita di adesione dei sistemi aggregato-bitume esposti all'azione dell'acqua.

La prima modifica del PATTI, eseguita da Youtcheff, consiste nella creazione di un determinato spessore tra aggregato e pistoncino, poiché nel testare i bitumi, a differenza delle vernici per le quali è sufficiente un sottile film nell'ordine di micron, è necessaria la formazione di un film di decimillimetri e quindi più elevato in modo da riprodurre le condizioni reali che si hanno all'interno di un conglomerato bituminoso.

Pertanto, i pistoncini vennero leggermente modificati mediante l'aggiunta di due blocchetti di metallo con dimensione 0,25 x 0,25 x 0,5 pollici interposti tra aggregato e pistoncino in modo da garantire che tra la superficie del pistoncino e quella dell'aggregato si venisse a localizzare uno spessore di bitume idoneo.

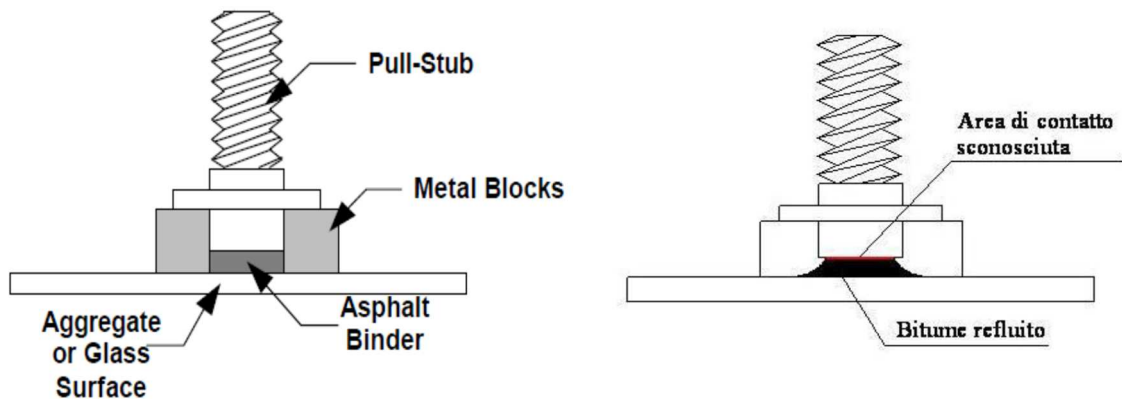


Figura 31 destra il pull stub modificato con i blocchetti metallici

Dopo questa modifica però, si è notato che le prove eseguite, producevano dati non ripetibili per le difficoltà di controllo delle variabili di prova poiché parte del bitume non confinato refluvia lateralmente, riducendo così l'area di contatto con il pistoncino, quindi, la forza di trazione che si leggeva dal modulo di controllo, si riferiva alla superficie di contatto di area sconosciuta.

Per questo motivo è stato realizzato un nuovo tipo di pistoncino dotato sul perimetro di un bordo munito di una serie di scanalature che avevano lo scopo di contenere il bitume applicato permettendo allo stesso tempo di far refluire quello in eccesso.

In questo modo su tutti i provini si riusciva ad ottenere la stessa quantità di bitume disposta sulla medesima area di contatto e quindi i risultati non dipendevano più da questa variabile

Le dimensioni dei nuovi pistoncini sono:

Diametro interno 0,5 pollici = 127 mm.

Diametro esterno = 137 mm.

Profondità (spessore bitume) = 3 mm.

Larghezza bordo = 0,5 mm.

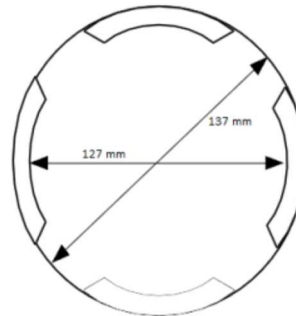


Figura 32 pull stub

### 3.4.2 Descrizione dell'apparecchiatura di prova

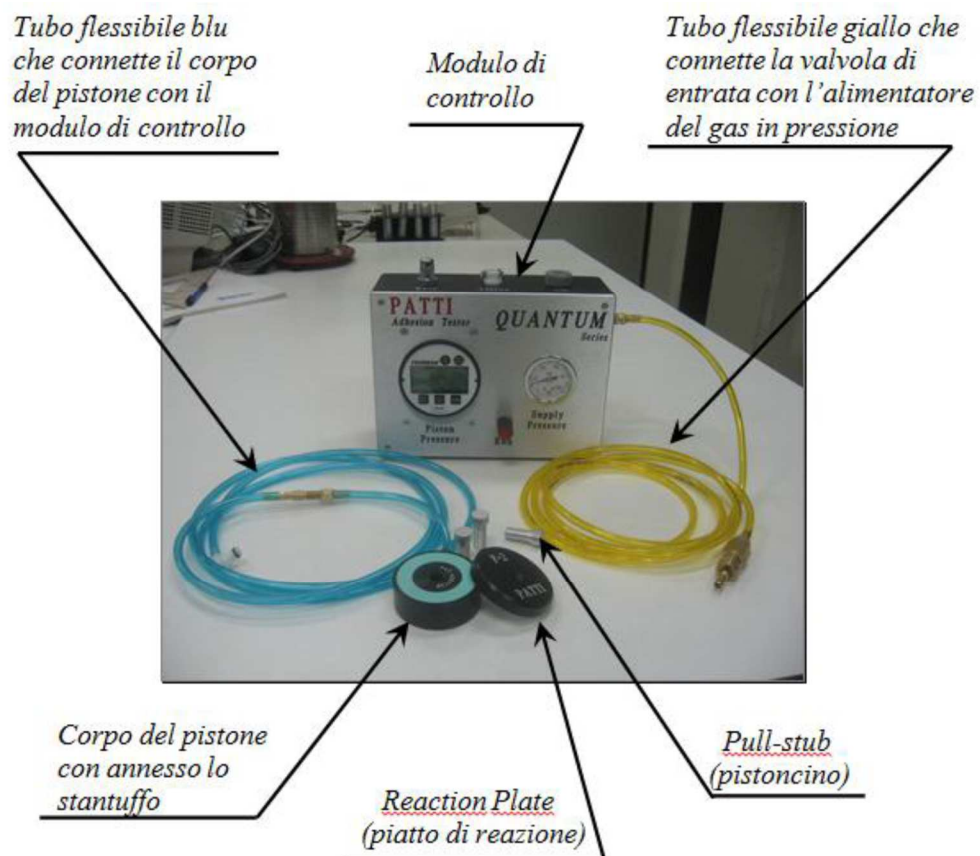


Figura 33 apparecchiatura di prova completa di tutte le sue parti

L'apparecchiatura di prova si compone di un'unità di controllo digitale alimentata mediante aria compressa (massimo 200 psi) tramite un tubo flessibile giallo munito di attacco rapido e da un pistone collegato all'unità di controllo tramite un tubo flessibile di colore azzurro.

Il pistone a sua volta è costituito da una sede cilindrica a cui si collega il tubo in entrata di colore azzurro e all'interno della quale scorre una guarnizione di colore azzurro.

Per effetto dell'applicazione dell'aria compressa tramite il tubo di colore azzurro la guarnizione tende a salire verso l'alto ma questo movimento viene impedito dal piatto di reazione posto in sommità a cui, tramite un foro filettato situato nel centro, si avvita il pistoncino (pull stub) che risulta incollato al supporto da testare.

In questo modo, quando il pistone entra in pressione, il piatto di reazione tira il Pull stub verso l'alto e, incrementando progressivamente la pressione applicata, si riesce a raggiungere la rottura del sistema con conseguente distacco del pistoncino dal supporto.

#### Standard pistons

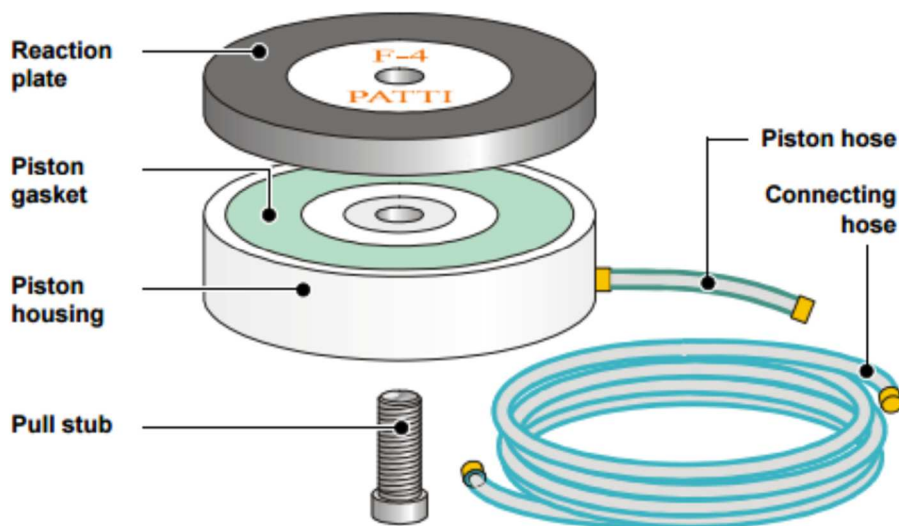


Figura 34 schema del pistone

Attraverso il modulo di controllo è possibile misurare in tempo reale il valore della pressione applicata BP (burst pressure) in psi, inoltre, lo strumento è in grado di registrare il valore minimo e massimo di pressione raggiunti durante la prova che potranno essere richiamati e visualizzati al termine della stessa.

Noto il valore massimo di BP misurato durante la prova si passa al valore del POTS (Pull-off Tensile Strength) tramite la seguente relazione riportata nella normativa AASHTO TP-91-13:



$$POTS = \frac{(B_P * A_g) - C}{A_{PS}}$$

dove:

- POTS (*Pull-Off Tensile Strength*) = Forza di trazione del tiraggio (psi);
- BP (*Burst Pressure*) = Pressione di rottura (psi);
- Ag = Area di contatto tra guarnizione e piatto di reazione = 1,914 pollici<sup>2</sup> per pistone F-2;
- C = Costante del pistone = 0,180 +/- 1,5% per pistone F-2;
- Aps = Area del pistoncino = 0,1963 pollici<sup>2</sup>.

Successivamente si passa al valore del POTS in psi a quello in kPa moltiplicando per il fattore di conversione.

$$POTS[kPa] = POTS[psi] * 6.8947573$$

La prova prevede anche che venga condotta un'analisi di tipo visivo della superficie di rottura in modo da stabilire se questa è di tipo coesivo, adesivo o intermedia tra le due.

In particolare, si definiscono:

- rottura coesiva quelle in cui la superficie di rottura viene a localizzarsi all'interno dello strato di bitume compreso tra la superficie dell'aggregato e la superficie del pistoncino senza che si verifichino distacchi da entrambe le interfacce.
- rottura adesiva quelle in cui la superficie di rottura viene a localizzarsi in corrispondenza di quella dell'aggregato con conseguente distacco dal supporto.
- “rottura coesiva/adesiva o ibrida” quelle mista tra le due precedenti:



Figura 35 rottura coesiva (a sinistra il pistoncino a destra l'aggregato)



*Figura 36 rottura adesiva (a sinistra il pistoncino a destra l'aggregato)*



*Figura 37 rottura adesiva/coesiva (a sinistra il pistoncino a destra l'aggregato)*

Qualora si osservino superfici di rottura caratterizzate da forti distacchi del bitume dal pistoncino la misura deve essere scartata perché in queste condizioni si andrebbe a misurare la forza di adesione del legante al pistoncino a cui non siamo interessati.



*Figura 38 distacco del bitume (a sinistra il pistoncino a destra l'aggregato)*

Solitamente questo tipo di problematiche si riscontrano quando sul pistoncino sono presenti residui di solventi o altre sostanze utilizzate per la pulizia o in caso di errori dell'operatore durante il confezionamento del provino.

In questa sperimentazione, tuttavia, parziali distacchi sono stati riscontrati in occasione dell'utilizzo dei bitumi modificati con il grafene (BB+GC) e quelli modificati con il compound polimerico BB+GC).

Una possibile spiegazione di questo fenomeno può essere data ipotizzando che la parte di polimero introdotta nel bitume base per effettuare la modifica, in realtà rimane dispersa sotto forma di particelle all'interno della matrice senza instaurare legami chimici, pertanto quando queste si vanno a posizionare in corrispondenza dell'interfaccia del pistoncino vanno a costituire un punto di discontinuità da cui si origina la cricca che causa il distacco del bitume dalla superficie del pistoncino.

Questi problemi non sono stati riscontrati con l'utilizzo dei bitumi modificati SBS HARD. Terminata la prova occorre prestare particolare attenzione alla pulizia dei pistoncini utilizzando metodi standardizzati ed evitando di lasciare residui di solventi o di altre sostanze utilizzate. Neppure una matrice nuova si può considerare pulita in quanto possono rimanere dei residui delle lavorazioni di lucidatura.

### *3.4.3 Preparazione di provini*

La preparazione dei provini utilizzati per le prove è stata eseguita attraverso le seguenti fasi:

Per prima cosa sono stati riscaldati gli aggregati in forno per due ore alla stessa temperatura del bitume impiegato indicata al paragrafo 2.1.2. Nel caso degli aggregati pre-bitumati, indipendentemente dal bitume utilizzato, il riscaldamento in forno è stato fatto sempre per due ore ma ad una temperatura inferiore pari a 60°C.

Successivamente sono state prelevate, da dei filamenti precedentemente realizzati, delle "palline di bitume del peso di 0.08 grammi" pesate tramite una bilancia di precisione che poi sono state poste sulla sommità dei pull stub posizionati con la testa verso l'alto su delle rastrelliere per evitarne il rovesciamento.



*Figura 39 filamenti di bitume a destra e palline di bitume pesate a sinistra*

In seguito le rastrelliere sono state poste in forno per trenta minuti alla temperatura prestabilita in modo da permettere al bitume di distendersi ed andare ad occupare tutta la superficie del pull stub.

La presenza del bordo trattiene il bitume fluido evitando che fuoriesca dalla testa del pull stub.



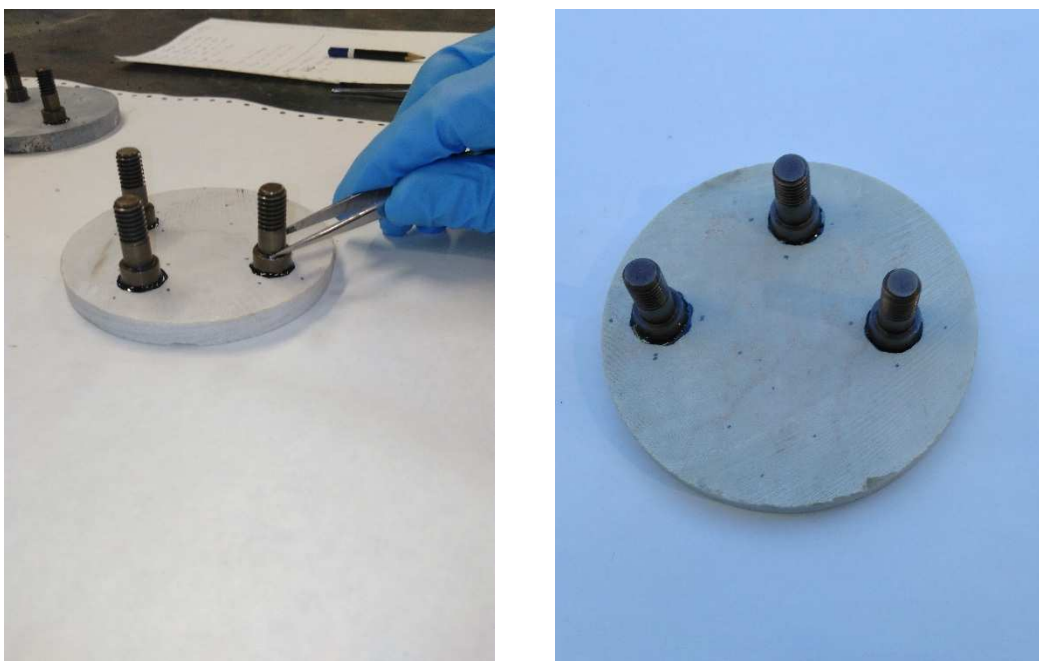
*Figura 40 pistoncini prima dell'inserimento in forno a destra e dopo il riscaldamento in forno per trenta minuti a sinistra.*

Terminata l'operazione di riscaldamento degli aggregati e del bitume si è proceduto all'incollaggio dei pull stub sul supporto.

In questa fase i pull stub sono stati prelevati uno ad uno dalle rastrelliere mantenendoli in posizione verticale e portati in prossimità dell'aggregato caldo precedentemente estratto dal forno, quindi sono stati capovolti, e premuti contro la superficie dell'aggregato in modo da consentire al bitume in eccesso di fuoriuscire dalle aperture laterali.

Per evitare il raffreddamento dell'aggregato e quindi l'alterazione dei risultati si è scelto di incollare un massimo di tre pull stub per ciascun supporto.

Terminate le operazioni di incollaggio i provini confezionati sono stati lasciati raffreddare all'aria a temperatura ambiente per un'ora, nel caso di quelli testati in condizioni "dry", e per due ore nel caso di quelli testati in condizioni "wet" in modo da permettere al bitume di sviluppare l'adesione con il supporto.



*Figura 41 incollaggio di un pull stub a destra e provini ultimati in fase di raffreddamento a sinistra*

Successivamente i provini ottenuti sono stati condizionati:

- per 24 ore in camera climatica a 25°C, nel caso delle condizioni "dry"
- per 24 ore in bagno termostatico più 1 ora in camera climatica a 25 °C, nel caso delle condizioni "wet"

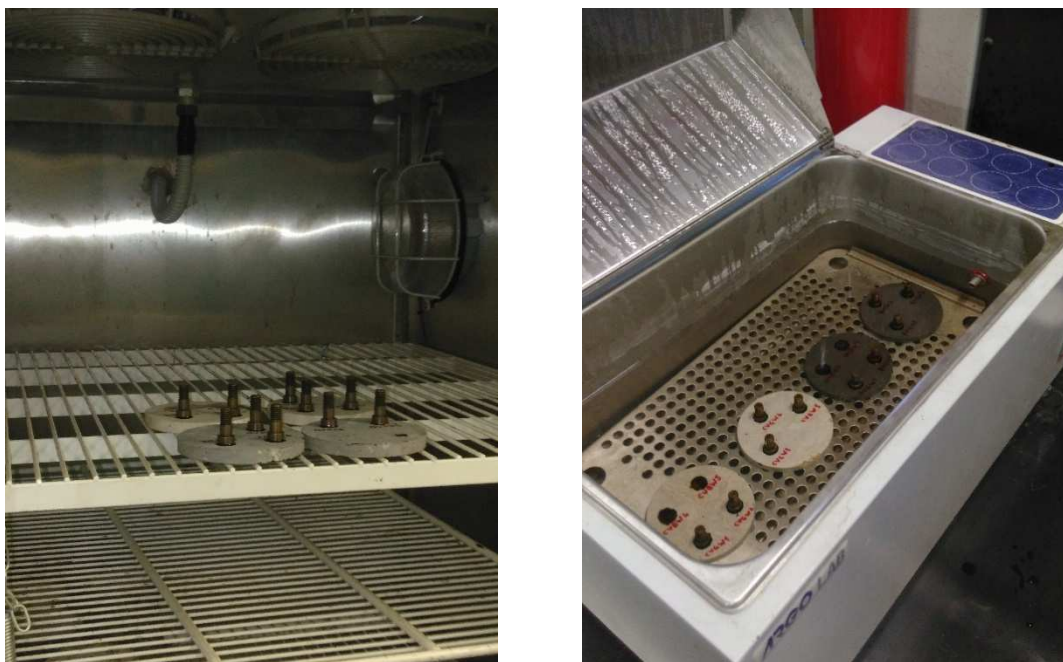


Figura 42 condizionamento dei provini in camera climatica a destra e in bagno termostatico a sinistra

### 3.4.4 Nomenclatura e codifica dei provini

Per quanto riguarda la codifica adottata per le singole ripetizioni eseguite sui vari tipi di aggregato, sia nelle tabelle che nei grafici, si è deciso di fare riferimento alla seguente nomenclatura in cui:

- La prima lettera identifica per il tipo di aggregato:
  - supporto di calcare (cod. "C")
  - supporto di basalto (cod. "B")
  - supporto di scoria (cod. "S")
  - supporto di resina chiara (cod. "R")
  - supporto di resina scura (cod. "L")
  
- La seconda lettera identifica il tipo di bitume:
  - Bitume base tradizionale Pen. 50/70 (cod. "B")  
(nei grafici questo bitume verrà indicato con la sigla "BB")
  - Bitume base modificato con 3% di compound polimerico (cod. "P")  
(nei grafici questo bitume verrà indicato con la sigla "BB+PC")

- Bitume base modificato con 3% di compound al grafene (cod. ‘G’) nei grafici questo bitume verrà indicato con la sigla “BB+GC”)
  - Bitume modificato SBS Hard 45/80-70 (cod. ‘H’)
  - Bitume modificato con lignina tipo S (cod. ‘S’)
  - Bitume modificato con lignina tipo B (cod. ‘B’)
  - Bitume modificato con lignina tipo M (cod. ‘M’)
  - Bitume base modifica 70/100 (cod. ‘N’)
  - Bitume base modifica 100/150 (cod. ‘O’)
  - Bitume SBS hard modificato con lignina (cod. ‘R’)
  - Bitume SBS hard non modificato (cod. ‘T’)
- La terza lettera identifica il tipo di trattamento superficiale:
    - assenza del trattamento superficiale ovvero materiale vergine (cod. ‘V’)
    - presenza del trattamento superficiale ovvero materiale artificiale (cod. ‘R’)
  - La quarta lettera identifica il tipo di condizionamento:
    - condizionamento in aria a 25 °C per 24 ore (cod. ‘D’)
    - condizionamento in acqua a 40 °C per 24 ore (cod. ‘W’)
  - Il numero finale variabile da 1 a 5 identifica la singola ripetizione eseguita su ciascun aggregato.

Di seguito viene riportato un esempio di codifica adottato

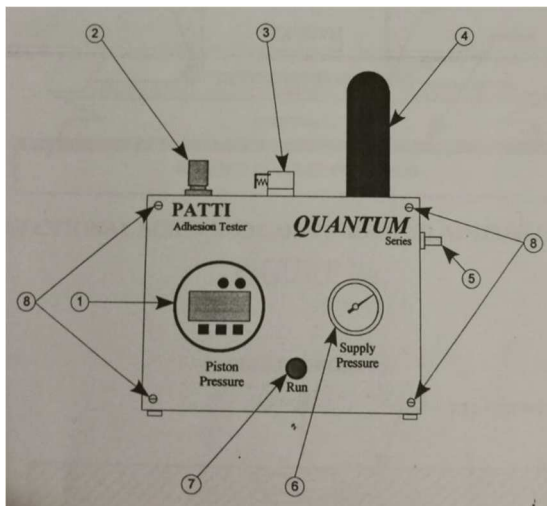
### **CVBD1**

che in accordo con le indicazioni fornite sopra identifica la ripetizione numero 1 eseguita su un provino di calcare vergine confezionato utilizzando come legante il bitume base e seguendo un condizionamento in aria a 25 gradi.

Nelle tabelle i valori di BP misurati in psig sono quelli registrati direttamente dell’apparecchiatura durante la prova da cui tramite delle elaborazioni è stato possibile risalire al valore in POTS espresso in kPa.

Per ciascuna delle cinque ripetizioni è stato poi calcolato anche il valore medio e la deviazione standard del POTS; quest'ultima è stata poi rappresentata nei grafici tramite le barre di errore in modo da controllare la dispersione dei dati misurati.

### 3.4.5 Esecuzione della prova



1. Manometro con display digitale
2. Valvola RATE
3. Connettore di uscita al pistone
4. Supporto cartuccia CO<sub>2</sub>
5. Valvola di ingresso aria compressa (max 200 psi)
6. Manometro di alimentazione
7. Bottone RUN
8. Viti piastra frontale per l'accesso alla sede della batteria (tipo 9V PP3)

Figura 43 schema di funzionamento dello strumento PATTI

Di seguito viene illustrata la procedura seguita per l'esecuzione della prova.

Per prima cosa si inserisce il tubo di alimentazione dell'apparecchiatura (PATTI QUANTUM) nella valvola alloggiata sul fianco destro indicata con il punto 5 nella figura 43, dopodiché si collega il tubo all'impianto dell'aria compressa.

Si accende lo strumento premendo il tasto ON-OFF collocato in prossimità del display digitale. Tramite il regolatore di pressione indicato con il punto 2 in figura 43 è possibile scegliere la velocità di incremento della pressione durante la prova che nel nostro caso è stata fissata a 2 psi al secondo e lasciata costante per tutte le prove.

Si va a collocare il corpo del pistone sul pull stub da testare quindi si va ad avvitare il piatto di reazione portandolo in battuta con la guarnizione blu. In questa fase è molto importante non serrare troppo il piatto per evitare di precaricare il provino e quindi alterare i risultati della prova. Si inserisce il tubo di alimentazione del pistone (di colore blu) al connettore di uscita 3 indicato nella figura 43. Se il connettore è correttamente inserito si sente un "clic" provenire dalla valvola.



Si richiamano sul display gli ultimi valori di pressione massima e minima misurati agendo sul pulsante Max Min e li si azzerano premendo il tasto zero clear.

Questa operazione è molto importante e se non viene fatta lo strumento andrà a memorizzare i nuovi valori di pressione solo se questi risultano essere maggiori dell'ultimo valore massimo registrato o minori di quello minimo.

Si dà inizio alla prova e mentre con una mano si tiene premuto il tasto run sullo strumento con l'altra si preme la base del corpo del cilindro sull'aggregato avendo cura di non interferire con il piatto di reazione per evitare di falsare le misure.

Non appena si sente un rumore sordo provenire dal pistone, che sta ad indicare che il pull stub si è staccato dall'aggregato, si lascia il pulsante Run e si interrompe la prova.

Quindi agendo nuovamente sul tasto Max e Min si va a leggere il valore di pressione massima raggiunta dal provino che deve essere annotata su un taccuino per le successive elaborazioni. Infine, si scollega il tubo di alimentazione del pistone si fa rientrare la guarnizione blu all'interno della sua sede spingendo sul piatto di reazione quindi si svita lo stesso dal pull stub e si va ad osservare il tipo di rottura ottenuta che ricordiamo potrà essere coesiva adesiva o ibrida tra le due.

Le immagini riportate di seguito mostrano la sequenza delle operazioni da compiere nella rottura di un provino.



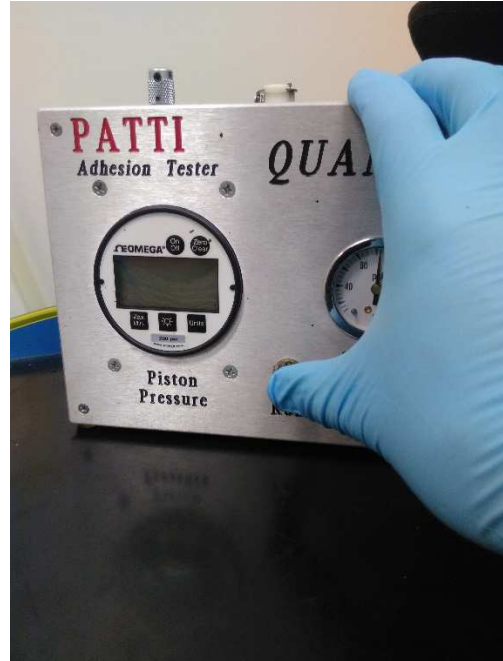
Figura 44 preparazione e accensione dello strumento



*Figura 45 inserimento del corpo del pistoncino sul pull-stub*



*Figura 46 posizionamento del piatto di reazione sul pull-stub*



*Figura 47 esecuzione della prova*



*Figura 48 provino dopo l'esecuzione della prova*

# 4 RISULTATI SPERIMENTALI

## 4.1 GENERALITA'

In questo capitolo sono riportati ed elaborati i risultati sperimentali ottenuti dalle prove in laboratorio, con l'obiettivo di valutare l'influenza delle variabili in gioco.

La rappresentazione dei dati sarà sia di tipo tabulare che grafica attraverso l'utilizzo di istogrammi in cui:

- in ascisse verranno indicati i vari tipi di aggregato utilizzato con specificato il tipo di condizionamento e il tipo di bitume impiegato
- in ordinate saranno riportati i valori di tensione POTS relativi alle singole ripetizioni testate. Quando si farà riferimento ai valori medi verrà indicata anche la barra di errore rappresentativa della deviazione standard del campione testato.

Le variabili che verranno prese in considerazione sono:

- Tipo di aggregato:
  - Aggregati costituiti da Calcare e Basalto entrambi sia vergini che pre-bitumati
  - Aggregati costituiti da scarti di lavorazioni industriali che nel caso specifico sono scorie d'altoforno elettrico e resine industriali si scarto.
- Tipo di bitume: bitume base, bitumi modificati con compound e bitumi in cui è stata aggiunta lignina in sostituzione di una percentuale del legante
- Tipo di condizionamento: Dry o Wet.

Per ciascuno dei materiali studiati sarà valutato l'effetto delle singole variabili a parità di tutte le altre, inoltre verrà condotta a posteriori anche l'analisi della varianza (ANOVA) finalizzata a valutare il livello di significatività della singola variabile di prova sulle proprietà di adesione e coesione dei sistemi bitume/aggregato.

## 4.2 VERIFICA DELLA VARIANZA ANOVA

Ma che cosa si intende esattamente per analisi statistica Anova?

ANOVA sta per Analysis Of Variance e fu formulata da Ronald Fisher nell'anno 1918. In pratica, rappresenta una tecnica statistica che viene utilizzata per verificare se le medie di due o più gruppi (nel nostro caso i valori del POTS ottenuti dalle prove BBS) sono significativamente diverse l'una dalle altre. L'obiettivo della tecnica è di verificare (“o di smentire”) l'ipotesi nulla attraverso l'utilizzo di un test statistico. Quando si esegue un'analisi della varianza ANOVA si fanno due ipotesi. La prima viene detta ipotesi nulla, ed è indicata con la lettera  $H_0$ , l'altra  $H_1$ . Solitamente l'ipotesi nulla, cerca di affermare che tutte le medie dei diversi gruppi siano uguali tra di loro. Per verificare l'ipotesi nulla, l'analisi ANOVA si basa su un test statistico, detto test F, in onore di Fisher. Il test F è semplicemente un rapporto tra due varianze e segue il valore della distribuzione F. Senza troppo entrare nel dettaglio del test statistico, possiamo dire che, in questo test, il numeratore del rapporto delle varianze, segue una distribuzione chi quadro, mentre il denominatore un'altra distribuzione chi quadro. Di fatto tale valore del test F è utile per essere confrontato con il *valore critico F statistico* che dipende dal livello di significatività alfa scelto per eseguire il test. Quest'ultimo assume solitamente valori pari al 5%, e ciò significa che assumendo l'ipotesi nulla, c'è meno del 5% di probabilità di ottenere come risultato il test F, che ci farà scartare l'ipotesi nulla e quindi smentire tale ipotesi.

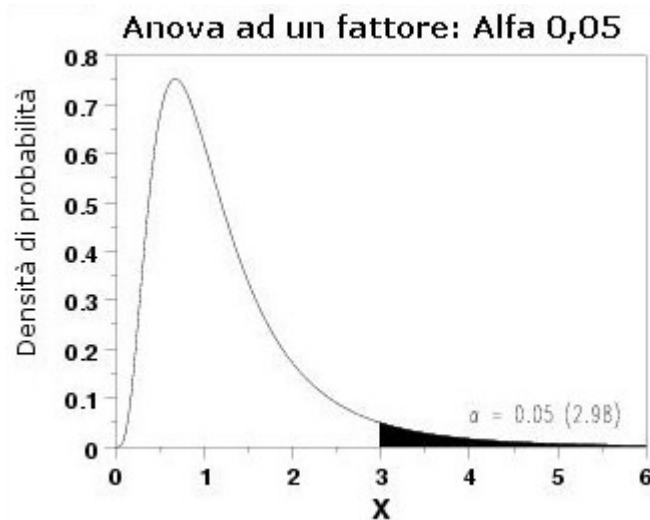


Figura 49 distribuzione statistica

Nell'immagine precedente possiamo vedere un grafico che segue la distribuzione statistica F. Noto il valore del test F, che ricordiamo e dato dal rapporto tra le varianze, possiamo entrare in ascisse con tale valore e determinare in ordinate la corrispondente probabilità. Se la probabilità è abbastanza bassa (minore in questo caso di 0,05), possiamo concludere che i nostri dati sono incoerenti con l'ipotesi nulla, e ciò significa che non è verificata, ma smentita (ciò si traduce in un valore di test F alto).

Al contrario se la probabilità è alta possiamo accettare l'ipotesi nulla  $H_0$  (ciò si traduce in un valore del test F basso).

Il valore critico F statistico è il valore limite che ci indica se accettare o meno l'ipotesi nulla confrontandolo con il test F. In pratica un valore del test F maggiore del valore critico F statistico, ci farà escludere l'ipotesi nulla, al contrario un valore più piccolo del valore critico F statistico ci farà accettare l'ipotesi nulla.

Nel nostro caso l'analisi statistica Anova verrà condotta andando a confrontare due gruppi di dati per volta in cui vengono tenute fisse due delle tre variabili che condizionano il sistema (per esempio tipo di aggregato e condizionamento) e facendo variare la terza ovvero il tipo di bitume. In questo modo, per ciascun confronto effettuato, sarà possibile determinare un valore di significatività (p-value) che:

- se  $> 0.05$  ci permette di confermare l'ipotesi nulla e quindi dire sostanzialmente che non c'è differenza tra i due gruppi di dati confrontati (caso in cui  $\text{test } F < F_{\text{critico}}$ ).
- se  $< 0.05$  ci permette di escludere l'ipotesi nulla e quindi dire sostanzialmente che c'è differenza tra i due gruppi di dati confrontati (caso in cui  $\text{test } F > F_{\text{critico}}$ ).

## 4.3 AGGREGATI VERGINI

### 4.3.1 Risultati sperimentali

Le tabelle che seguono riepilogano la totalità dei risultati dei sistemi bitumi/aggregati vergini considerando tutte le variabili di prova (tipo di bitume, tipo di aggregato e tipo di condizionamento).

Tipo di legante	Tipo di aggregato	Condizione di prova	nome provino	Ripetizione	BP [psig]	POTS [psi]	POTS [kPa]	Media POTS [kPa]	Dev.standard [kPa]	Tipo di rottura
BB (T=135°C)	Calcare	DRY	CVBD1	1	54,9	534,38	3684,41	3373,83	191,88	coesiva
			CVBD2	2	49	476,85	3287,78			coesiva
			CVBD3	3	48,9	475,88	3281,05			coesiva
			CVBD4	4	51	496,35	3422,23			coesiva
			CVBD5	5	47,6	463,20	3193,66			coesiva
		WET	CVBW1	1	45,9	446,63	3079,37	2706,94	357,90	coesiva
			CVBW2	2	44,6	433,95	2991,98			coesiva
			CVBW3	3	41,2	400,80	2763,41			coesiva
			CVBW4	4	33,1	321,82	2218,88			coesiva
			CVBW5	5	37	359,85	2481,06			coesiva
	Basalto	DRY	BVBD1	1	50,5	491,48	3388,62	3290,47	144,86	coesiva
			BVBD2	2	45,3	440,78	3039,04			coesiva
			BVBD3	3	49,2	478,80	3301,22			coesiva
			BVBD4	4	49,8	484,65	3341,56			coesiva
			BVBD5	5	50,4	490,50	3381,89			coesiva
		WET	BVBW1	1	14,6	141,44	975,18	972,50	79,77	adesiva
			BVBW2	2	15,6	151,19	1042,41			adesiva
			BVBW3	3	15,8	153,14	1055,86			adesiva
			BVBW4	4	13	125,84	867,62			adesiva
			BVBW5	5	13,8	133,64	921,40			adesiva
BB+PC (T=145 °C)	Calcare	DRY	CVPD1	1	47,5	462,23	3186,94	3135,85	182,97	coesiva
			CVPD2	2	48,1	468,08	3227,27			coesiva
			CVPD3	3	48,3	470,03	3240,72			coesiva
			CVPD4	4	47,9	466,13	3213,83			coesiva
			CVPD5	5	41,9	407,62	2810,47			coesiva
		WET	CVPW1	1	43,2	420,30	2897,86	2955,68	91,88	coesiva
			CVPW2	2	44,2	430,05	2965,09			coesiva/ adesiva
			CVPW3	3	42,6	414,45	2857,53			coesiva/ adesiva
			CVPW4	4	46,2	449,55	3099,54			coesiva
			CVPW5	5	44,1	429,07	2958,37			coesiva
	Basalto	DRY	BVPD1	1	55,5	540,23	3724,75	3465,26	203,61	coesiva
			BVPD2	2	53,3	518,78	3576,85			coesiva
			BVPD3	3	47,6	463,20	3193,66			coesiva
			BVPD4	4	50	486,60	3355,00			coesiva
			BVPD5	5	51,8	504,15	3476,01			coesiva
		WET	BVPW1	1	16,4	158,99	1096,19	1089,47	91,56	adesiva
			BVPW2	2	16,7	161,91	1116,36			adesiva
			BVPW3	3	14,8	143,39	988,63			adesiva
			BVPW4	4	15,3	148,26	1022,24			adesiva
			BVPW5	5	18,3	177,52	1223,92			adesiva

Tabella 50 risultati prove su aggregati di calcare e basalto vergini

Tipo di legante	Tipo di aggregato	Condizione di prova	nome provino	Ripetizione	BP [psig]	POTS [psi]	POTS [kPa]	Media POTS [kPa]	Dev.standard [kPa]	Tipo di rottura
BB+GC (T=145 °C)	Calcare	DRY	CVGD1	1	43,5	423,22	2918,03	3135,40	340,37	coesiva
			CVGD2	2	42	408,60	2817,19			coesiva
			CVGD3	3	49,6	482,70	3328,11			coesiva
			CVGD4	4	47,2	459,30	3166,77			coesiva
			CVGD5	5	54,7	532,43	3670,97			coesiva
		WET	CVGW1	1	48,7	473,93	3267,61	2998,70	286,01	coesiva
			CVGW2	2	37,9	368,62	2541,56			coesiva
			CVGW3	3	47,3	460,28	3173,49			coesiva
			CVGW4	4	43,5	423,22	2918,03			coesiva
			CVGW5	5	46,1	448,58	3092,82			coesiva
	Basalto	DRY	BVGD1	1	36,3	353,02	2434,00	3287,78	845,76	coesiva
			BVGD2	2	52,6	511,95	3529,79			coesiva
			BVGD3	3	63,2	615,31	4242,39			coesiva
			BVGD4	4	57,5	559,73	3859,20			coesiva
			BVGD5	5	35,4	344,25	2373,50			coesiva
WET		BVGW1	1	23,5	228,22	1573,50	1378,54	215,86	adesiva	
		BVGW2	2	24,2	235,04	1620,56			adesiva	
		BVGW3	3	16,7	161,91	1116,36			adesiva	
		BVGW4	4	18,5	179,47	1237,37			adesiva	
		BVGW5	5	20,1	195,07	1344,93			adesiva	
SBS (T=160 °C)	Basalto	DRY	BVHD1	1	58,7	571,43	3939,87	4004,41	202,94	coesiva
			BVHD2	2	64	623,11	4296,17			coesiva
			BVHD3	3	59,3	577,28	3980,21			coesiva
			BVHD4	4	60,6	589,96	4067,60			coesiva
			BVHD5	5	55,7	542,18	3738,19			coesiva
	WET	BVHW1	1	15,1	146,31	1008,80	1221,23	200,03	adesiva	
		BVHW2	2	21,5	208,72	1439,05			adesiva	
		BVHW3	3	20,5	198,97	1371,82			adesiva	
		BVHW4	4	19	184,34	1270,98			adesiva	
		BVHW5	5	15,2	147,29	1015,52			adesiva	

Tabella 51 risultati prove su aggregati di calcare e basalto vergini

Ne grafici riportati di seguito sono presentati sottoforma di istogrammi i dati riassunti nelle tabelle precedenti.



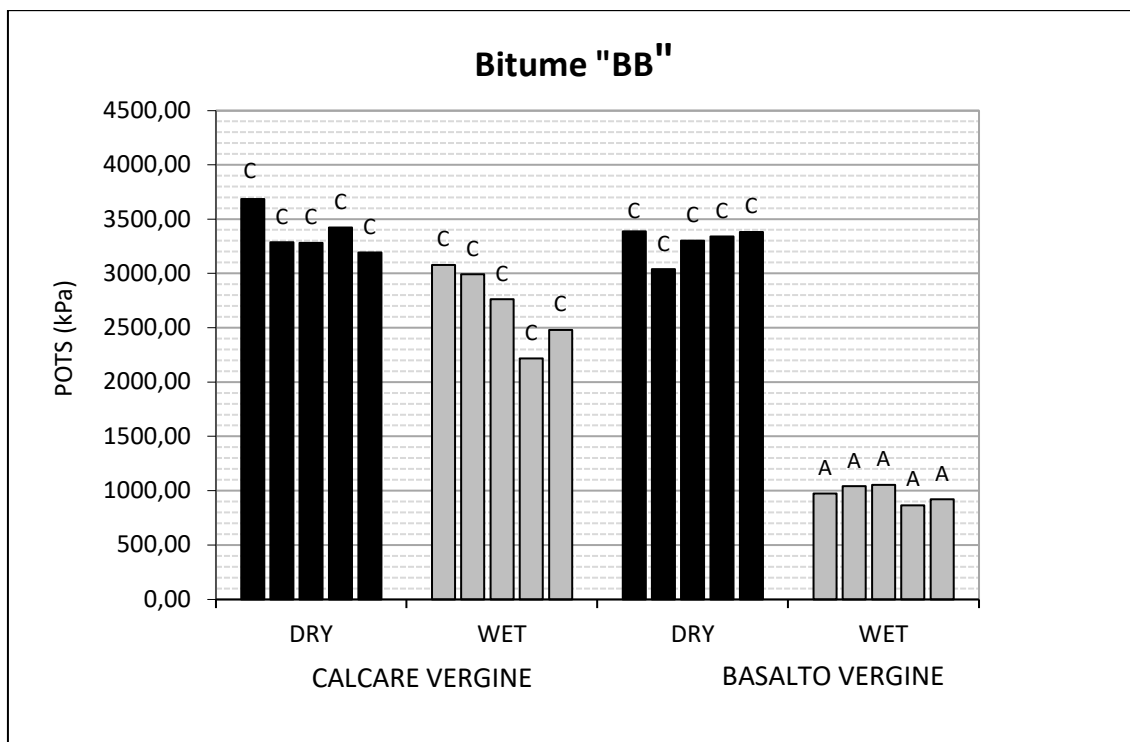


Figura 52 rappresentazione dei risultati ottenuti su aggregati vergine con il bitume "BB"

La figura 52 riporta i risultati delle prove BBS eseguite sul calcare e sul basalto vergini utilizzando come legante il bitume base "BB".

Dall'analisi del grafico è possibile notare che in condizioni "dry" per entrambi gli aggregati si osservano rotture coesive caratterizzate da valori di POTS comparabili dell'ordine di 3200÷3300 kPa.

Negli aggregati basaltici l'immersione in acqua produce una significativa perdita di adesione, infatti si osservano tutte rotture adesive associate a POTS di circa 1000 kPa.

Diversamente per gli aggregati calcarei l'acqua sembra avere una ridotta influenza, infatti, le rotture continuano ad essere coesive, e associate ad una riduzione di circa il 15% dei valori di POTS misurati rispetto alla condizione asciutta.

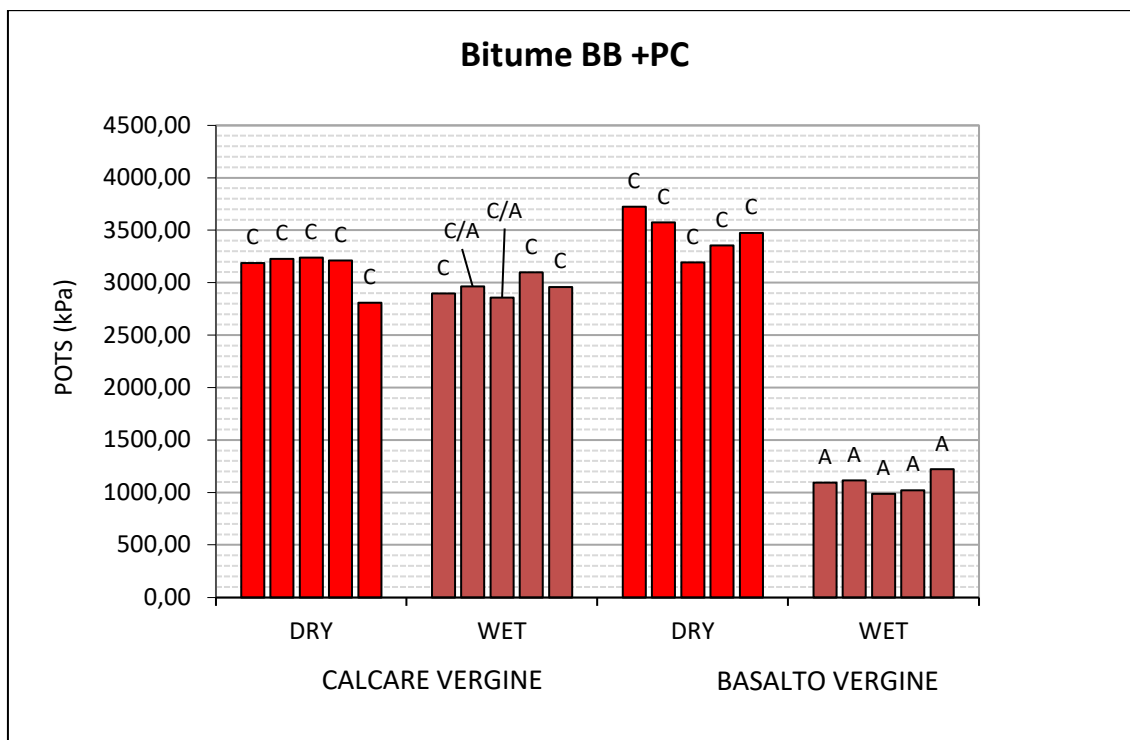


Figura 53 rappresentazione dei risultati ottenuti sugli aggregati vergine con il bitume “BB+PC”

La figura 53 riporta i risultati relativi alle prove BBS eseguite sui provini di calcare e basalto confezionati impiegando come legante il bitume modificato con il compound polimerico (BB+PC).

In prima analisi si nota come nelle condizioni “DRY”, sul basalto, si verificano rotture di tipo coesivo caratterizzate da livelli di POTS leggermente superiori rispetto a quelle misurate sui provini di calcare e questo andamento può essere riconducibile ad una diversa finitura superficiale dell’aggregato che interagisce direttamente con il bitume.

In presenza di acqua, come osservato nel caso dei provini confezionati con il bitume “BB”, in entrambi i tipi di aggregati si ha un peggioramento delle prestazioni in termini di adesione, specialmente per l’aggregato basaltico dove, a seguito di rotture di tipo adesivo, si osserva un crollo di circa il 68% dei valori medi del POTS.

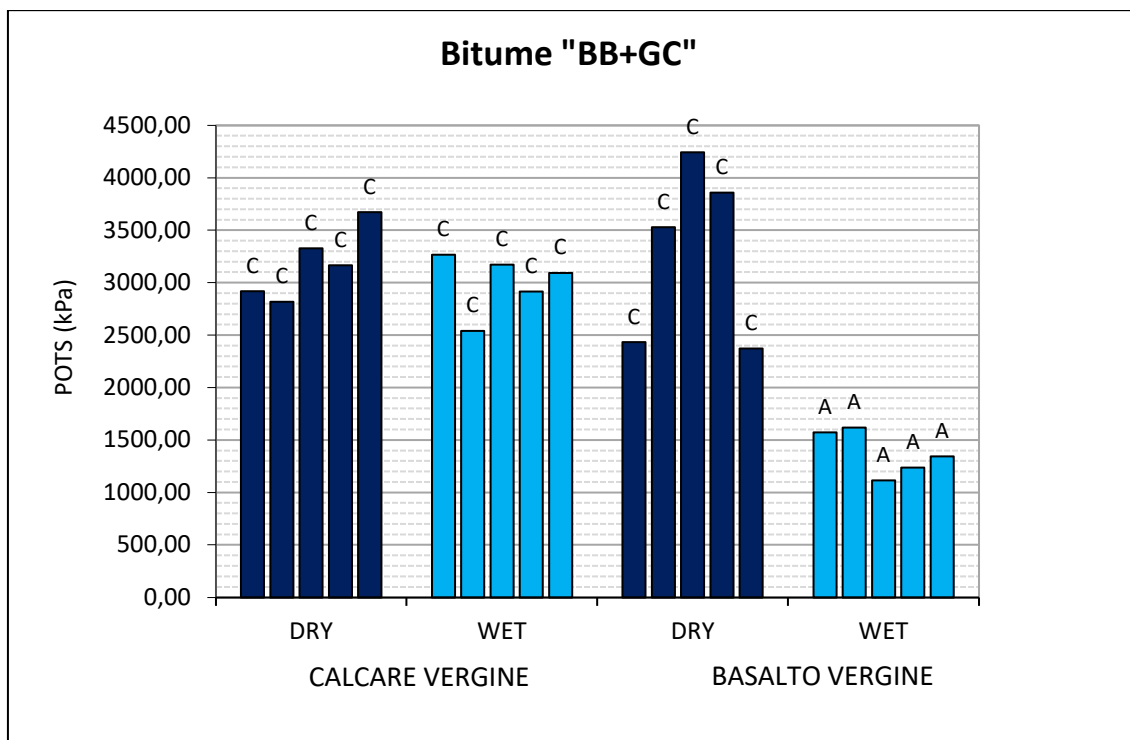


Figura 54 rappresentazione dei risultati ottenuti sugli aggregati vergine con il bitume "BB+PC"

La figura 54 riporta i dati relativi alle prove BBS eseguite sui provini di calcare e basalto realizzati utilizzando come legante il bitume modificato con il compound al grafene (BB+GC).

Rispetto ai due casi precedenti si nota una maggiore dispersione dei dati, tuttavia, è possibile riscontrare una tendenza simile a quello dei casi studiati con i bitumi "BB" e "BB+PC" ovvero rotture prevalentemente coesive in condizioni "dry" con valori di POTS comparabili e rotture adesive con associata sensibile riduzione del POTS in condizioni "wet" nel caso di aggregato basaltico.

Nel caso di aggregato calcareo in condizioni "wet", l'effetto dell'acqua non sembra influenzare né il tipo di rottura né il POTS.

### 4.3.2 Influenza del tipo di bitume e del condizionamento a parità di aggregato

#### 4.3.2.1 Aggregato calcareo vergine

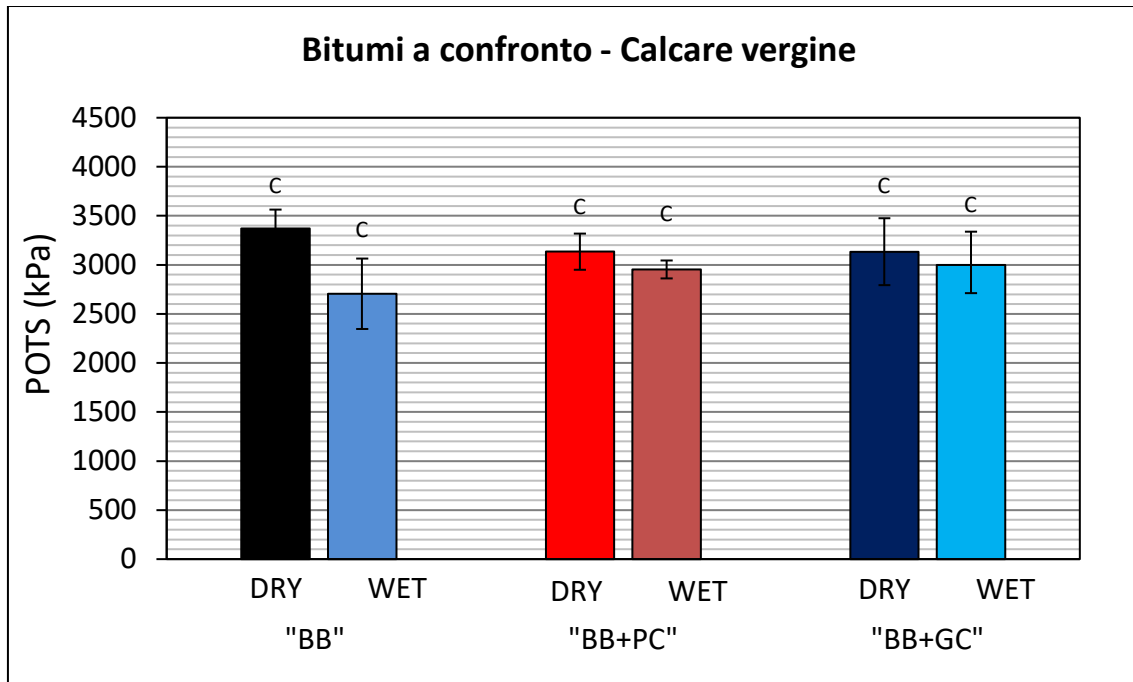


Figura 55 confronto tra diversi tipi di bitume nelle condizioni "dry" e "wet" su aggregati calcarei

La figura 55 mostra il confronto tra i tre tipi di bitume testati nelle due condizioni "dry" e "wet" facendo riferimento al solo aggregato di calcare vergine al fine di valutare l'effetto del tipo di bitume sulle proprietà di adesione coesione dei sistemi testati.

In condizioni asciutte si osserva come i valori medi del POTS, siano compresi tra 3100 e 3350 Kpa, e le rotture sono tutte di tipo coesivo, pertanto, sembra che i 3 bitumi abbiano un comportamento alquanto comparabile, ovvero, l'aggiunta dei polimeri per la modifica dei bitumi non sembra influenzare significativamente la risposta del sistema bitume-aggregato calcareo sia in termini di adesione che di coesione.

Passando ad analizzare le condizioni bagnate le rotture sono prevalentemente coesive e si osserva una generale riduzione dei valori del POTS calcolati rispetto alla condizione asciutta pari a:

- circa il 20% nei provini confezionati con il” BB “.
- circa il 6% nei provini confezionati con i bitumi modificati “BB+PC” e “BB+GC”.

Pertanto, si può affermare che, nel caso di utilizzo di aggregato calcareo, l’immersione in acqua sembra causare una riduzione delle proprietà coesive (rammollimento del legante) esclusivamente per il bitume tradizionale, diversamente i due bitumi modificati sembrano risentire meno degli effetti dell’acqua.

Le rotture, anche in questo caso, sono tutte di tipo coesivo e i valori misurati non presentano grosse variazioni dal valore medio.

Si riporta ora l’analisi statistica ANOVA eseguita su questo gruppo di risultati per stabilire se i campioni di dati confrontati presentino o meno delle differenze significative dal punto di vista statistico in termini di tipologia di bitume. A tal fine si è assunta una soglia del p-value pari a 0.05 ovvero valori del p-value inferiori a tale soglia ci permettono di rifiutare l’ipotesi nulla e quindi di dire che i campioni confrontati sono statisticamente differenti.

Calcare vergine			
dry		wet	
tipi di bitume	p-value	tipi di bitume	p-value
BB / BB+PC	0,0796	BB / BB+PC	0,1707
BB / BB+GC	0,3001	BB / BB+GC	0,1923
BB+PC / BB+GC	0,8039	BB+PC / BB+GC	0,7570

*Tabella 56 influenza del tipo di bitume su aggregati di calcare vergine*

La tabella 56 è stata ottenuta confrontando i valori del POTS (5 ripetizioni) ottenuti testando a coppia i vari bitumi a parità di aggregato e di condizionamento in modo da valutare l’influenza del tipo di bitume.

Come si può osservare, in entrambe le condizioni di prova, il p-value risulta superiore al valore di soglia di 0.05, pertanto, si può ritenere che dal punto di vista statistico, non vi siano differenze significative tra i bitumi testati.

Quanto riscontrato permette di affermare che nel caso di utilizzo di aggregato calcareo, i bitumi modificati con compound non sembrano influenzare significativamente il legame di adesione con l’aggregato.

#### 4.3.2.2 Aggregato basaltico vergine

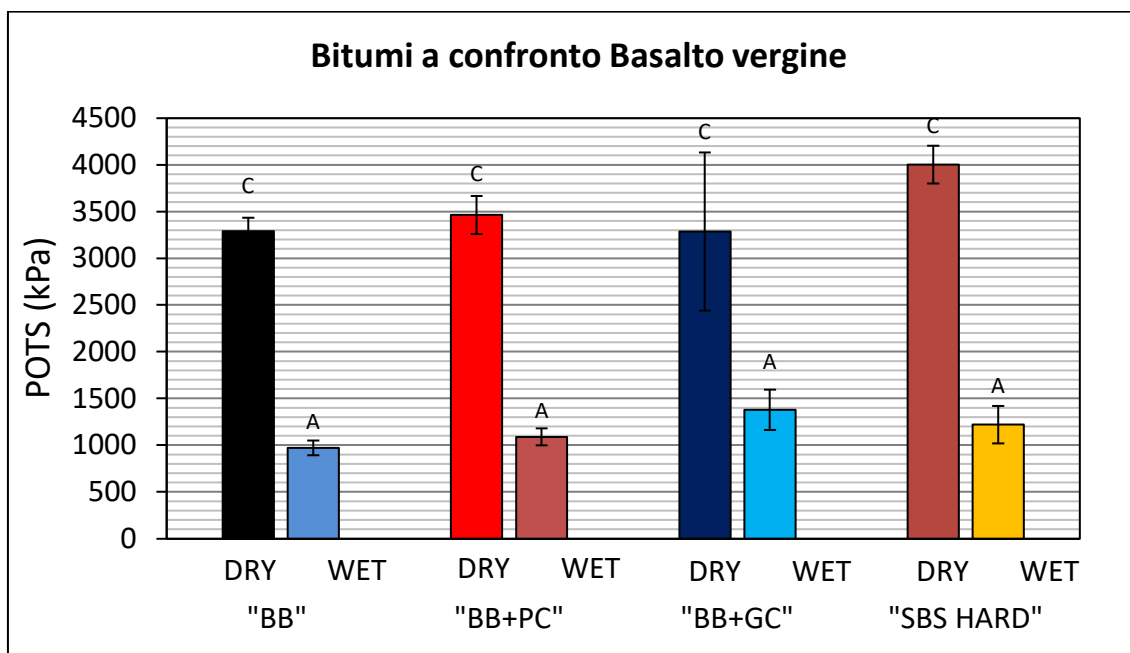


Figura 57 confronto tra diversi tipi di bitume nelle condizioni "dry" e "wet" su aggregati basaltici

La figura 57 mostra il confronto tra i diversi sistemi bitume-aggregato nelle due condizioni "dry" e "wet", da notare che è stato preso in esame un ulteriore tipo di bitume denominato SBS HARD 45/80-70 che poi è quello con cui verranno preparati gli aggregati pre-bitumati.

Dall'analisi del grafico si evince che in condizioni asciutte, tutti i sistemi bitume-aggregato, manifestano rotture prevalentemente coesive, dunque, senza mostrare perdita di adesione. Il sistema che presenta una risposta migliore è quello confezionato con il bitume SBS HARD dove i valori medi del POTS risultano essere superiore di circa il 20% rispetto al bitume tradizionale e quelli modificati con il compound.

Considerata l'elevata dispersione che caratterizza i sistemi prodotti con il bitume modificato con compound al grafene, è possibile affermare che il bitume base modifica ed i bitumi modificati con compound mostrano valori di POTS comparabili.

In condizioni bagnate le rotture all'interfaccia sono di tipo adesivo in tutti i casi analizzati con associato crollo dei valori medi di POTS di circa il 70% per i provini confezionati con il bitume "BB", del 68% per quelli realizzati con il bitume "BB+PC"

ed infine del 60% per i provini confezionati con il bitume “BB+GC” che sembra essere quello meno suscettibile all’acqua.

In presenza d’acqua, i due bitumi modificati con il compound polimerici tendono ad esibire valori di POTS comparabili se non migliori (come nel caso dei compound al grafene), con quelli del bitume modificato con SBS e questo suggerisce che la modifica con questa tipologia di compound polimerici garantisce adeguate proprietà adesive e coesive che invece sono meno evidenti nel bitume base.

Di seguito si riporta l’analisi ANOVA sull’aggregato di basalto vergine.

<b>basalto</b>			
dry		wet	
tipi di bitume	p-value	tipi di bitume	p-value
<b>BB / BB+PC</b>	0,1564	BB / BB+PC	0,0634
<b>BB / BB+GC</b>	0,9946	BB / BB+GC	0,0043
<b>BB+PC / BB+GC</b>	0,6604	BB+PC / BB+GC	0,0248
<b>BB/SBS</b>	0,0002	BB/SBS	0,0325
<b>BB+PC / SBS</b>	0,0030	BB+PC / SBS	0,0715
<b>BB+GC/SBS</b>	0,1027	BB+GC/SBS	0,4915

*Tabella 58 influenza del tipo di bitume su aggregati di basalto vergine*

La tabella 58 mostra i risultati ottenuti confrontando i valori del POTS (5 ripetizioni) ottenuti con i vari tipi di bitumi testati a parità di aggregato (basalto vergine) e di tipologia di condizionamento (“dry” o “wet”).

Si può osservare che nelle condizioni “dry” sussistono delle differenze significative solo nei confronti realizzati tra il bitume SBS e i bitumi “BB” e “BB+PC” dove si ottengono valori del p-value < 0.05, diversamente il confronto con il bitume “BB+GC” non evidenzia alcuna differenza, verosimilmente dovuto alla elevata dispersione dei dati per i sistemi con tale bitume.

Passando ad analizzare le condizioni “wet”, i casi in cui sussistono differenze significative, sono tre e riguardano il confronto tra i due bitumi con i compound polimerici, il confronto tra il bitume base e quello modificato con il grafene ed infine il confronto tra il bitume SBS e il bitume base.

Tali risultati evidenziano, essenzialmente, che i bitumi modificati con compound mostrano prestazioni comparabili con il bitume modificato con SBS anche in presenza d'acqua.

La seguente tabella mostra l'influenza del tipo di condizionamento "dry" e "wet" sul legame di adesione dei sistemi testati ed è stata ottenuta confrontando i valori del POTS dei campioni ottenuti nelle due condizioni asciutto bagnato a parità di tipo di aggregato e di tipo di bitume impiegato.

tipo di bitume	tipo di aggregato	
	calcare	basalto
BB	0,006291	0,0000000012
BB+PC	0,084656	0,0000000104
BB+GC	0,387967	0,0012074957
SBS	–	0,00000002038

*Tabella 59 influenza del tipo di condizionamento*

Come si può vedere, nel caso degli aggregati di calcare, il p-value risulta sempre maggiore di 0.05 ad eccezione del primo caso ovvero quello relativo ai provini realizzati su supporto di calcare utilizzando come legante il bitume base, dunque, evidenziando che i bitumi modificati con compound polimerici mostrano una minore suscettività all'acqua in termini di coesione.

Diversamente passando ad analizzare il basalto si vede come in tutti i casi il p-value sia significativamente al di sotto della soglia di 0.05 evidenziando che sul basalto l'acqua influisce negativamente provocando un crollo dei valori del POTS determinando rotture di tipo adesivo indipendentemente dal tipo di bitume analizzato.



## 4.4 AGGREGATI PRE-BITUMATI

### 4.4.1 Risultati sperimentali

Le tabelle che seguono riepilogano la totalità dei risultati dei sistemi bitumi/aggregati pre-bitumati considerando tutte le variabili di prova (tipo di bitume, tipo di aggregato e tipo di condizionamento).

Tipo di legante	Tipo di aggregato	Condizione di prova	nome provino	Ripetizione	BP [psig]	POTS [psi]	POTS [kPa]	Media POTS [kPa]	Dev.standard [kPa]	Tipo di rottura
BB (T=135 °C)	Calcare	DRY	CRBD1	1	45	437,85	3018,87	2743,24	205,07	coesiva
			CRBD2	2	42,5	413,47	2850,80			coesiva
			CRBD3	3	40,5	393,97	2716,35			coesiva
			CRBD4	4	39,6	385,20	2655,85			coesiva
			CRBD5	5	36,9	358,87	2474,34			adesiva
		WET	CRBW1	1	46	447,60	3086,10	3363,07	223,74	coesiva
			CRBW2	2	53,4	519,75	3583,57			coesiva
			CRBW3	3	52	506,10	3489,46			coesiva
			CRBW4	4	47,1	458,33	3160,05			coesiva
			CRBW5	5	52,1	507,08	3496,18			coesiva
	Basalto	DRY	BRBD1	1	37,7	366,67	2528,12	2768,79	194,34	coesiva
			BRBD2	2	45,5	442,73	3052,48			coesiva
			BRBD3	3	40,4	393,00	2709,63			coesiva
			BRBD4	4	42,4	412,50	2844,08			coesiva
			BRBD5	5	40,4	393,00	2709,63			coesiva
WET		BRBW1	1	36,9	358,87	2474,34	2403,08	219,73	coesiva	
		BRBW2	2	34,8	338,40	2333,16			coesiva	
		BRBW3	3	40,4	393,00	2709,63			coesiva	
		BRBW4	4	35,7	347,17	2393,66			coesiva	
		BRBW5	5	31,4	305,25	2104,59			coesiva	
BB+PC (T=145 °C)	Calcare	DRY	CRPD1	1	38,1	370,57	2555,01	2376,19	234,70	coesiva
			CRPD2	2	33,3	323,77	2232,32			coesiva
			CRPD3	3	31,4	305,25	2104,59			coesiva
			CRPD4	4	34,5	335,47	2312,99			coesiva
			CRPD5	5	39,9	388,12	2676,02			coesiva
		WET	CRPW1	1	45,9	446,63	3079,37	3039,04	160,50	coesiva
			CRPW2	2	48,6	472,95	3260,89			coesiva
			CRPW3	3	42,2	410,55	2830,64			coesiva
			CRPW4	4	45,8	445,65	3072,65			coesiva
			CRPW5	5	44	428,10	2951,64			coesiva
	Basalto	DRY	BRPD1	1	43,4	422,25	2911,31	2745,93	149,92	coesiva
			BRPD2	2	42,5	413,47	2850,80			coesiva
			BRPD3	3	39,2	381,30	2628,96			coesiva
			BRPD4	4	41,5	403,72	2783,58			coesiva
			BRPD5	5	38,1	370,57	2555,01			coesiva
WET		BRPW1	1	37,8	367,65	2534,84	2210,81	248,35	coesiva	
		BRPW2	2	35,5	345,22	2380,22			coesiva	
		BRPW3	3	32,2	313,05	2158,37			coesiva	
		BRPW4	4	28,5	276,97	1909,63			coesiva	
		BRPW5	5	30,9	300,37	2070,98			coesiva	

Tabella 60 risultati prove su aggregati di calcare e basalto pre-bitumati

Tipo di legante	Tipo di aggregato	Condizione di prova	nome provino	Ripetizione	BP [psig]	POTS [psi]	POTS [kPa]	Media POTS [kPa]	Dev.standard [kPa]	Tipo di rottura
BB+GC (T=145 °C)	Calcare	DRY	CRGD1	1	35,8	348,15	2400,39	2509,29	181,54	coesiva
			CRGD2	2	38,8	377,40	2602,07			coesiva
			CRGD3	3	38,5	374,47	2581,90			coesiva
			CRGD4	4	40,4	393,00	2709,63			coesiva
			CRGD5	5	33,6	326,70	2252,49			coesiva/adesiva
		WET	CRGW1	1	44,6	433,95	2991,98	2690,81	222,93	coesiva
			CRGW2	2	41,6	404,70	2790,30			coesiva
			CRGW3	3	40,7	395,92	2729,80			coesiva
			CRGW4	4	36,9	358,87	2474,34			coesiva
			CRGW5	5	36,8	357,90	2467,61			coesiva
	Basalto	DRY	BRGD1	1	41	398,85	2749,96	2748,62	183,46	coesiva
			BRGD2	2	40,3	392,02	2702,91			coesiva
			BRGD3	3	39,9	388,12	2676,02			coesiva
			BRGD4	4	45,5	442,73	3052,48			coesiva
			BRGD5	5	38,2	371,55	2561,73			coesiva
		WET	BRGW1	1	35,6	346,20	2386,94	2486,44	201,59	coesiva/adesiva
			BRGW2	2	35,7	347,17	2393,66			coesiva/adesiva
			BRGW3	3	33,7	327,67	2259,21			coesiva/adesiva
			BRGW4	4	39,5	384,22	2649,13			coesiva/adesiva
			BRGW5	5	40,9	397,87	2743,24			coesiva/adesiva

Tabella 61 risultati prove su aggregati di calcare e basalto pre-bitumati

I grafici che verranno proposti di seguito riassumono i risultati riportati nelle tabelle sopra.

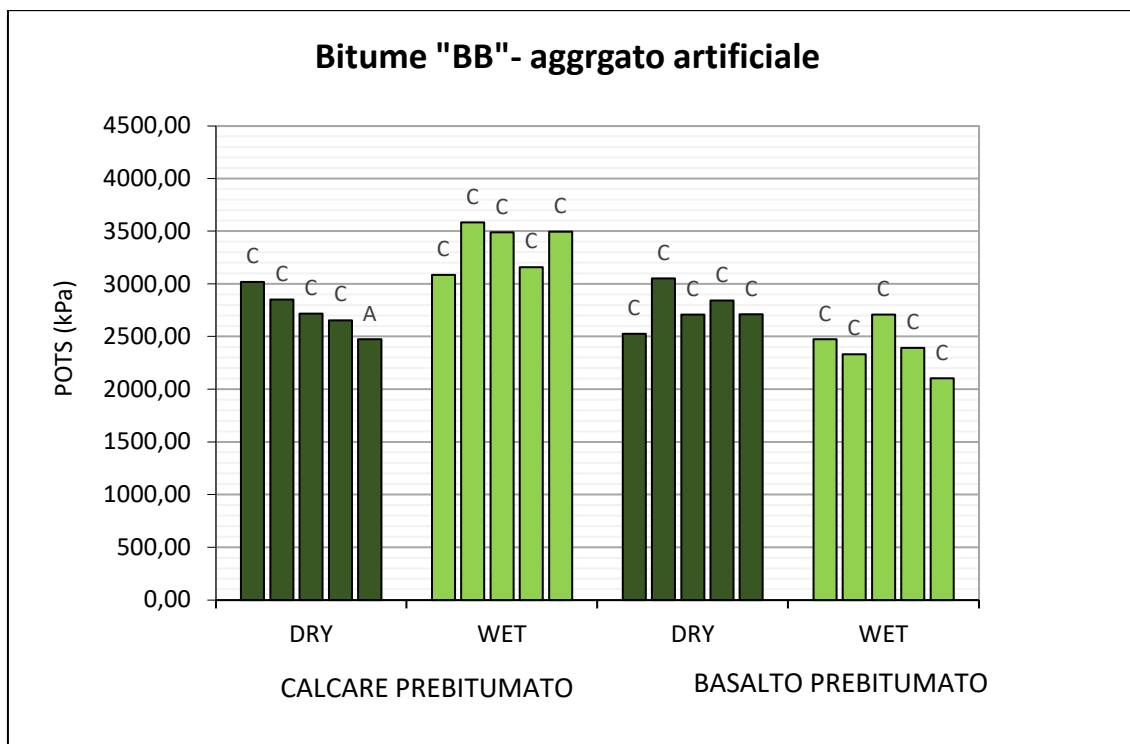


Figura 62 rappresentazione dei risultati ottenuti sugli aggregati pre-bitumati con il bitume "BB"

La figura 62 mostra i risultati delle prove BBS eseguite sul calcare e sul basalto pre-bitumati utilizzando come legante il bitume "BB".

Da notare che in condizioni "dry" in entrambi gli aggregati si osservano rotture prevalentemente coesive caratterizzate da valori medi del POTS di circa 2700 kPa. L'unica rottura adesiva è quella registrata nel provino CRBD5 che tra l'altro è quello con il valore di POTS più basso di tutta la serie testata e probabilmente questo è imputabile a problemi in fase di confezionamento dello stesso.

Nelle prove in acqua gli aggregati calcarei tendono a mostrare valori del POTS confrontabili con quelli in condizioni asciutte se non migliori.

Diversamente per gli aggregati di basalto pre-bitumati l'acqua sembra avere una ridotta influenza, infatti rispetto alla condizione asciutta, si riscontra una riduzione del livello medio del POTS di circa il 13% a fronte di rotture che comunque sono tutte di tipo coesivo.

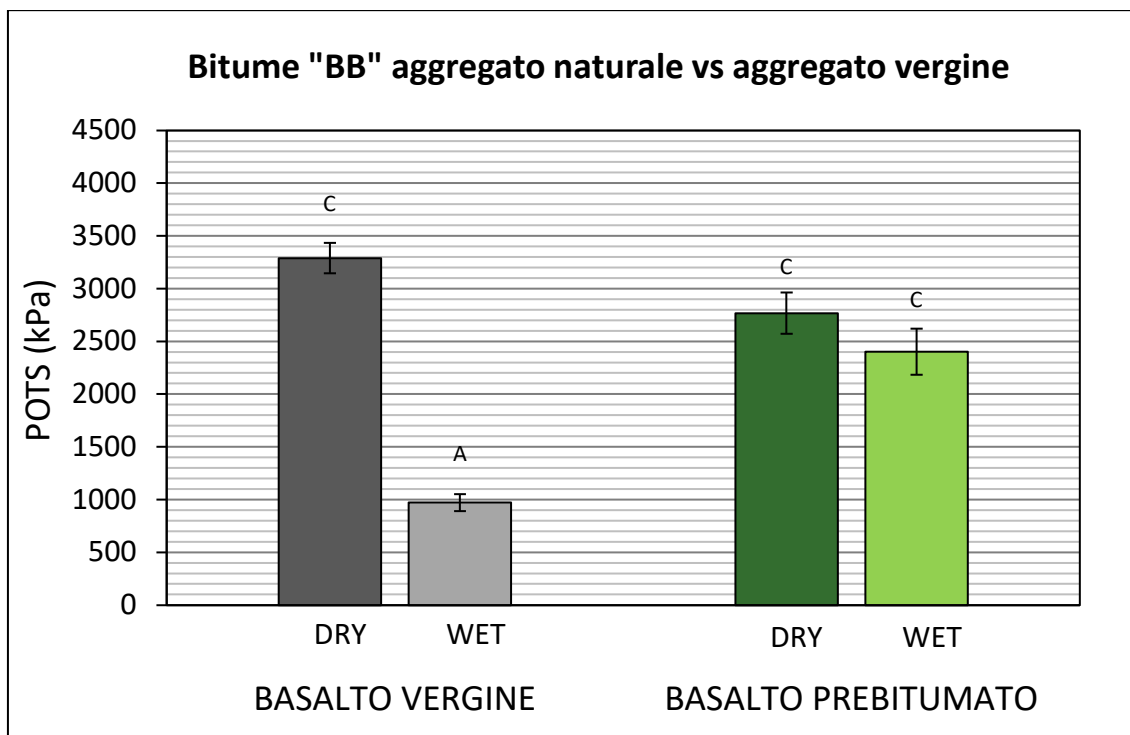


Figura 63 confronto tra aggregati di basalto vergine e pre-bitumati in presenza di bitume "BB"

La figura 63 mostra il confronto dei valori medi del POTS ottenuti sugli aggregati di basalto vergine e su quelli pre-bitumati nelle due condizioni di prova "dry" e "wet" utilizzando come legante il bitume "BB".

Dal confronto si evince che nel sistema pre-bitumato l'immersione in acqua non produce una significativa riduzione del valore medio del POTS come invece accade per il sistema realizzato con aggregato di basalto vergine in cui tra l'altro le rotture sono di tipo adesivo. La presenza del rivestimento sull' aggregato, pertanto, impedisce il rammollimento del bitume e migliora le performance del sistema.

Con riferimento al condizionamento "dry" si vede come i valori medi del POTS raggiunti dal sistema confezionato con l'aggregato vergine siano confrontabili se non migliori rispetto a quelli mostrati dal sistema confezionato con l'aggregato pre-bitumato.

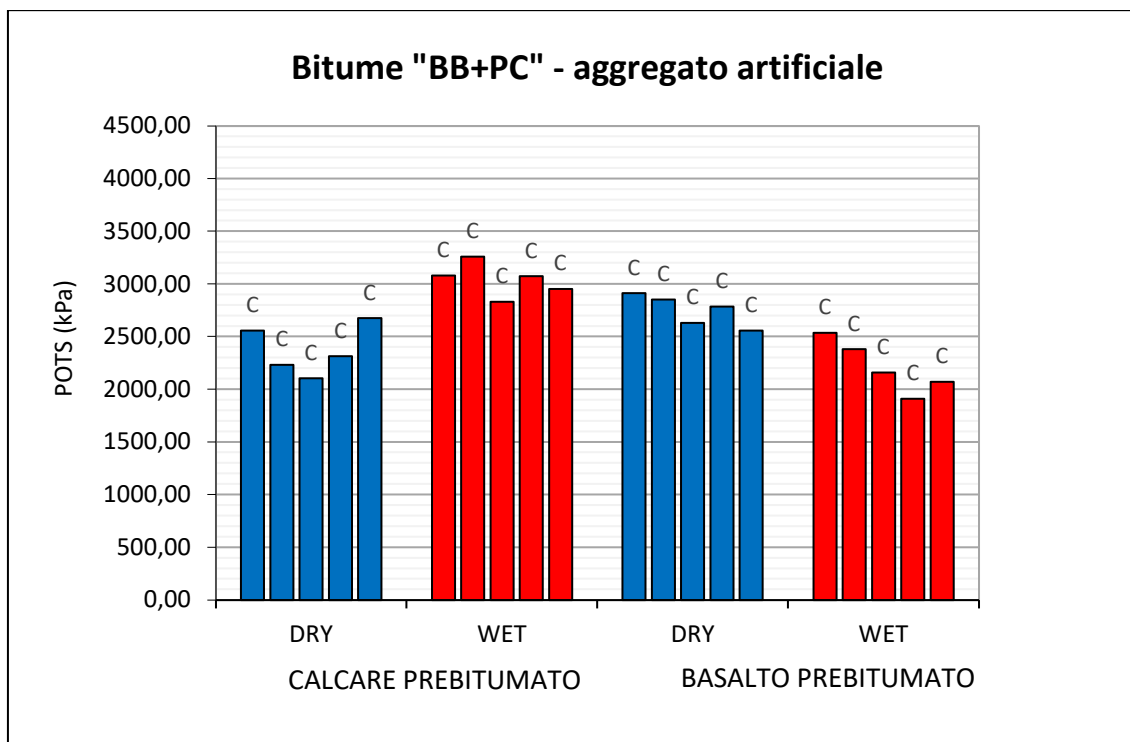


Figura 64 rappresentazione dei risultati ottenuti sugli aggregati pre-bitumati con il bitume "BB+PC"

La figura 64 mostra il confronto dei valori del POTS ottenuti sugli aggregati di calcare e basalto pre-bitumati nelle due condizioni di prova "dry" e "wet" utilizzando come legante il bitume "BB+PC".

Prendendo in esame la condizione di prova "dry" si vede come, a fronte di rotture di tipo coesivo, il basalto pre-bitumato tenda ad assumere valori medi del POTS leggermente superiori rispetto a quelli riscontrati sul calcare pre-bitumato e questa tendenza era stata osservata anche in occasione del confronto tra i provini di calcare e basalto vergini testati sempre con il bitume "BB" +PC".

Passando ad analizzare le condizioni di prova "WET" si nota come negli aggregati basaltici i valori del POTS tendano ad essere inferiori rispetto a quelli registrati nelle medesime condizioni sul calcare pre-bitumato pur continuando ad avere rotture di tipo coesivo.

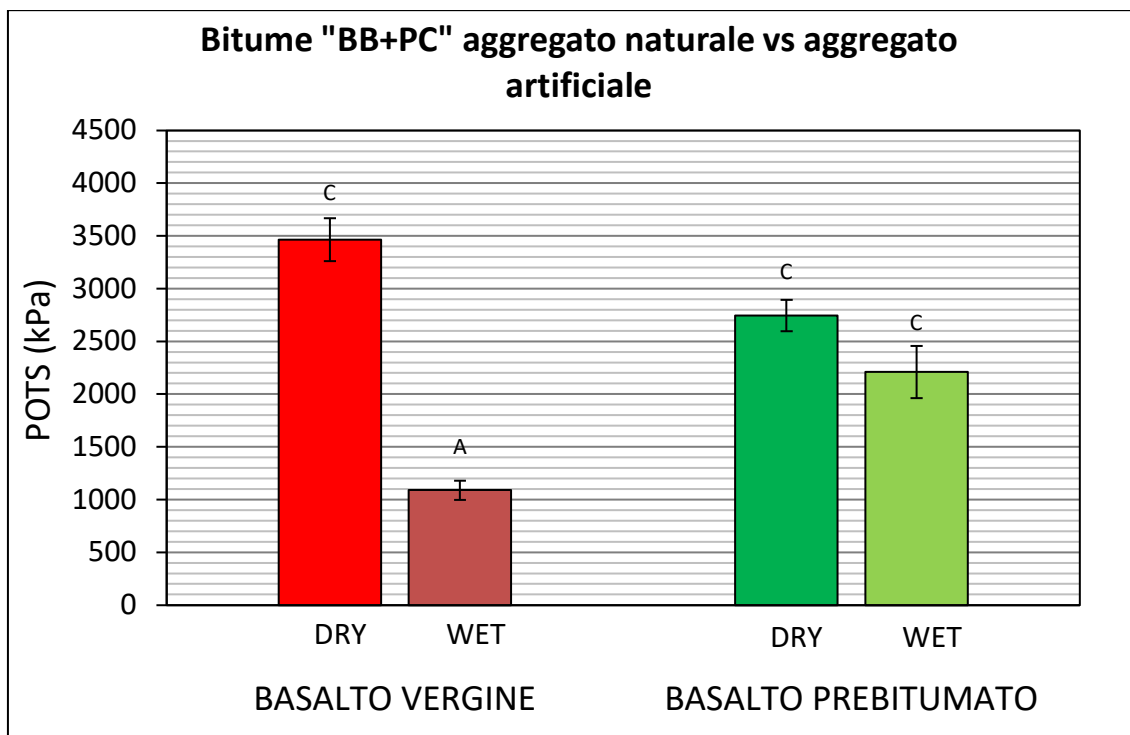


Figura 65 confronto tra aggregati di basalto vergine e pre-bitumati in presenza di bitume "BB+PC"

La figura 65 mostra il confronto dei valori medi del POTS ottenuti sugli aggregati di basalto vergine e su quelli pre-bitumati nelle due condizioni di prova "dry" e "wet" utilizzando come legante il bitume "BB+PC".

Dal grafico si osserva che nei provini pre-bitumati i valori medi del POTS calcolati nelle condizioni "dry" e "wet" sono confrontabili tra loro, inoltre, le rotture osservate in entrambi i casi sono tutte di tipo coesivo a differenza dei sistemi confezionati con il basalto vergine dove, nelle prove con condizionamento "wet", si verificavano rotture di tipo adesivo con associati bassi valori del POTS.

È interessante notare come in condizioni "dry" il valore medio del POTS tenda ad essere superiore nel basalto vergine piuttosto che in quello pre-bitumato pur ottenendo in entrambi i casi rotture di tipo coesivo e questo andamento può essere legato ad una diversa interazione, a livello chimico, del legante con la superficie dell'aggregato.

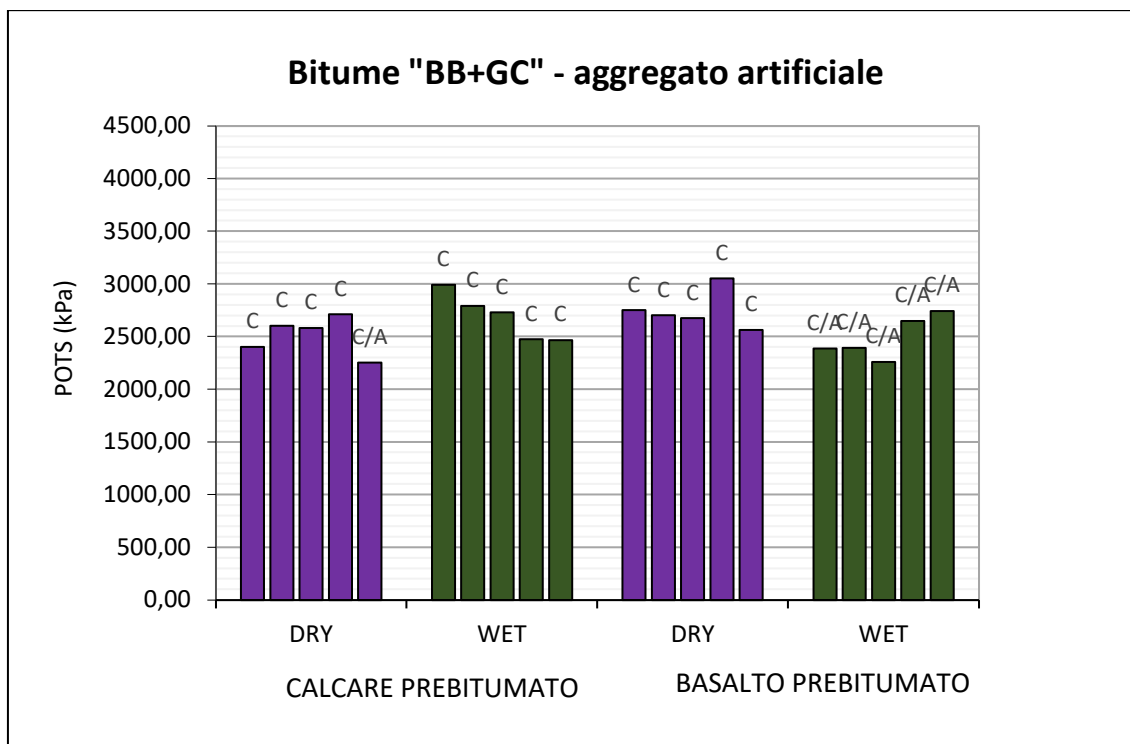


Figura 66 rappresentazione dei risultati ottenuti sugli aggregati pre-bitumati con il bitume "BB+GC"

La figura 66 mostra il confronto dei valori del POTS ottenuti sugli aggregati di calcare e basalto pre-bitumati nelle due condizioni di prova "dry" e "wet" utilizzando come legante il bitume "BB+GC".

È interessante notare come l'immersione in acqua determini delle rotture di tipo ibrido nei provini di basalto pre-bitumato, cosa che non era stata riscontrata nei due casi analizzati in precedenza dove erano state osservate sempre rotture di tipo coesivo.

Questo potrebbe significare che il bitume "BB+GC" non lega bene con quello utilizzato per il rivestimento dell'aggregato che ricordiamo essere SBS HARD, per cui, all'interfaccia iniziano a manifestarsi dei distacchi dal supporto che chiaramente vanno a penalizzare i valori del POTS misurati. Infatti, nei quattro casi messi a confronto nel grafico i provini di basalto pre-bitumato testati in condizioni "wet" sono quelli che hanno restituito i valori medi del POTS più bassi.

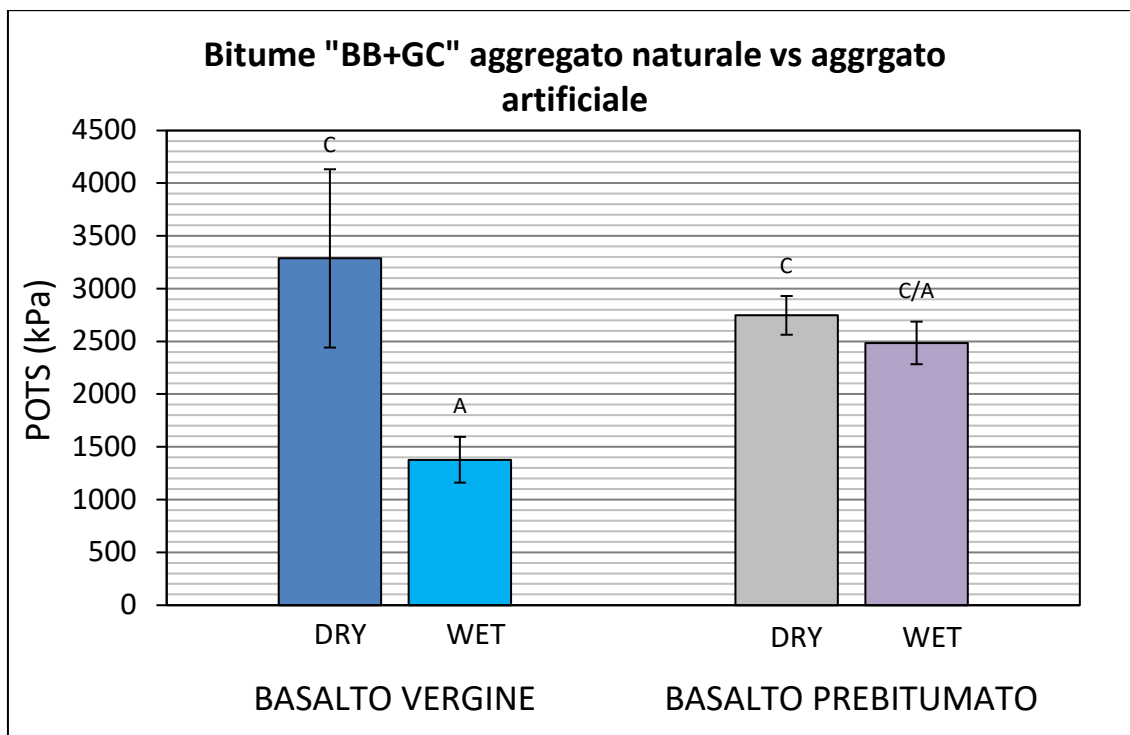


Figura 67 confronto tra aggregati di basalto vergine e pre-bitumati in presenza di bitume "BB+PC"

La figura 67 mostra il confronto dei valori medi del POTS ottenuti sugli aggregati di basalto vergine e su quelli pre-bitumati nelle due condizioni di prova "dry" e "wet" utilizzando come legante il bitume "BB+GC".

Analizzando il grafico si vede che nei provini pre-bitumati, i valori medi del POTS nelle due condizioni di prova "dry" e "wet" sono molto simili anche se le rotture riscontrate nelle prove con condizionamento "wet" non sono coesive come nei due casi analizzati in precedenza ma ibride.

Da sottolineare la grande variabilità dei risultati delle prove effettuate sul basalto vergine in condizioni "dry".



#### 4.4.2 Influenza del tipo di bitume e del condizionamento a parità di aggregato

##### 4.4.2.1 Aggregato calcareo pre-bitumato

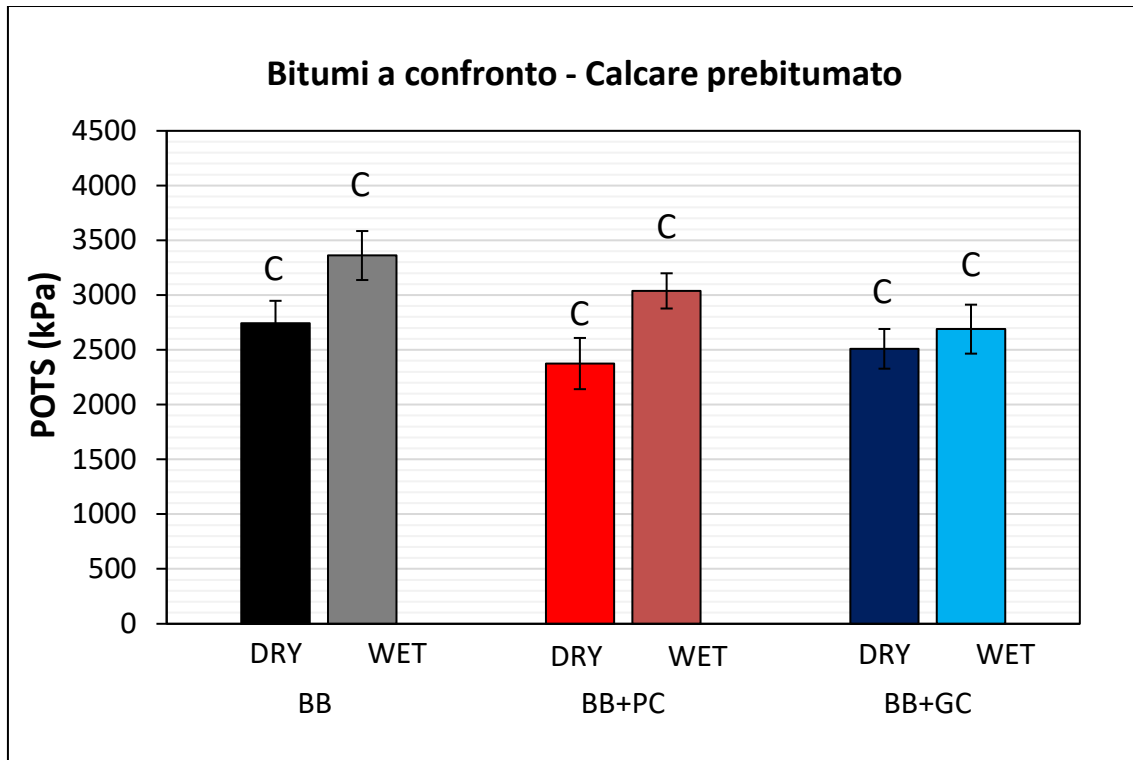


Figura 68 confronto tra diversi tipi di bitume nelle condizioni “dry” e “wet” su aggregati calcarei pre-bitumati

La figura 68 mostra il confronto tra i tre tipi di bitume testati nelle due condizioni “dry” e “wet” facendo riferimento al solo aggregato di calcare pre-bitumato al fine di valutare l’effetto del tipo di bitume sulle proprietà di adesione/coesione dei sistemi testati.

Prendendo in esame le condizioni “dry” si osserva come a fronte di rotture coesive si ottengano per i tre bitumi testati, valori medi del POTS compresi tra 2700 e 2300 kPa.

Quanto appena detto vale anche per le condizioni di prova “wet” dove i tre bitumi mostrano valori medi del POTS confrontabili tra loro e simili a quelli registrati in condizione “dry”

Questo ci suggerisce che, nel caso di aggregato calcareo pre-bitumato, i tre bitumi siano confrontabili ovvero la presenza dei polimeri utilizzati per la modifica non sembra

influenzare la risposta del sistema bitume aggregato calcareo sia in termini di adesione che coesione nelle due condizioni di prova “dry” e “wet”.

Si riporta ora l’analisi statistica ANOVA eseguita su questo gruppo di risultati per stabilire se i campioni di dati confrontati presentino o meno delle differenze significative dal punto di vista statistico in termini di tipologia di bitume.

Calcare pre-bitumato			
dry		wet	
tipi di bitume	p-value	tipi di bitume	p-value
BB / BB+PC	0,0300	BB / BB+PC	0,0301
BB / BB+GC	0,0925	BB / BB+GC	0,0014
BB+PC / BB+GC	0,3452	BB+PC / BB+GC	0,0220

*Tabella 69 influenza del tipo di bitume in presenza di calcare pre-bitumato*

La tabella 69 è stata ottenuta confrontando i valori del POTS (5 ripetizioni) ottenuti con i vari bitumi testati a parità di condizionamento e di tipo di aggregato, che in questo caso, è il calcare pre-bitumato.

In tutti i casi analizzati, ad eccezione di quelli in cui il bitume “BB+GC” viene messo a confronto con i bitumi “BB” e “BB+PC”, si ottengono valori del p.value < 0.05 che ci suggerisce che i vari tipi di bitume confrontati influenzano la risposta del sistema in termini di proprietà di adesione/coesione.

#### 4.4.2.2 Aggregato basaltico pre-bitumato

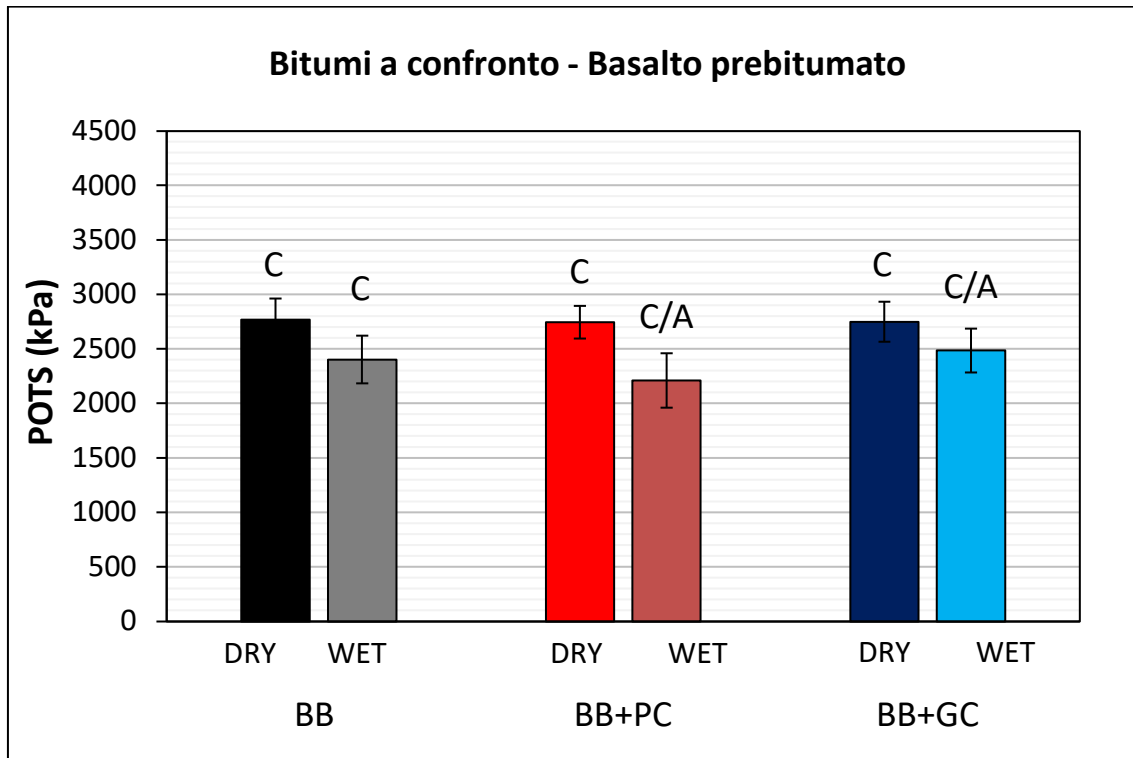


Figura 70 confronto tra diversi tipi di bitume nelle condizioni “dry” e “wet” su aggregati di basalto pre-bitumati

La figura 70 mostra il confronto tra i tre bitumi testati nelle due condizioni “dry” e “wet” facendo riferimento al solo aggregato di basalto pre-bitumato.

Prendendo in esame le condizioni “dry” si vede come i tre bitumi presentino praticamente lo stesso valore medio del POTS a fronte di rotture tutte di tipo coesivo.

Passando ad analizzare le condizioni “wet” si evince che tutti e tre i bitumi tendono a mostrare valori medi del POTS leggermente inferiori di quelli misurati nelle rispettive condizioni “dry” ma comunque confrontabili.

In acqua, inoltre, le rotture all’interfaccia tendono ad essere ibride quando si è in presenza di bitumi confezionati con il compound polimerico a differenza dei provini confezionati con il bitume base dove sono di tipo coesivo.

In conclusione, possiamo dire che anche per gli aggregati di basalto pre-bitumati l’utilizzo dei bitumi modificati non sembra influenzare la risposta del sistema in termini di adesione/coesione sia nelle condizioni di prova “dry” che in quelle “wet”.

Concludiamo ora questa parte dell'analisi dei dati proponendo le verifiche statistiche ANOVA.

Basalto pre-bitumato			
dry		wet	
tipi di bitume	p-value	tipi di bitume	p-value
BB / BB+PC	0,8403	BB / BB+PC	0,2309
BB / BB+GC	0,8702	BB / BB+GC	0,5493
BB+PC / BB+GC	0,9804	BB+PC / BB+GC	0,0902

*Tabella 71 influenza del tipo di bitume in presenza di basalto pre-bitumato*

La tabella 71 mostra i risultati ottenuti confrontando, dal punto di vista statistico, i valori del POTS calcolati considerando i tre bitumi testati a parità di aggregato (basalto pre-bitumato) e di condizionamento.

In tutti e 6 i casi analizzati si ottengono valori del p-value  $>0.05$  e questo ci permette di confermare l'ipotesi nulla, ovvero, di dire che sul basalto pre-bitumato i bitumi testati non influenzano i risultati della prova.

La tabella sottostante mostra l'influenza del tipo di condizionamento eseguito sul legame di adesione dei sistemi analizzati ed è stata costruita confrontando i risultati ottenuti nelle due condizioni di prova ("dry" e "wet") utilizzando per ciascuno dei due aggregati lo stesso bitume.

tipo di bitume	p-value	
	calcare	basalto
BB	0,001834	0,0236410047
BB+PC	0,00081	0,0033219282
BB+GC	0,195718	0,0636900167

*Tabella 72 influenza del tipo di condizionamento*

Si nota che in tutti i casi presi in esame, ad eccezione di quello relativo ai provini confezionati con il bitume modificato con il compound al grafene sugli aggregati di calcare, il p-value risulta abbondantemente al di sotto del valore di soglia pari a 0.05 e questo suggerisce che in realtà, il tipo di condizionamento, influenza i risultati della prova.

## 4.5 AGGREGATI DA RICICLO - EAF (Electric Arc Furnace)

### 4.5.1 Risultati sperimentali

Nella tabella riportata di seguito sono riassunti i risultati delle prove BBS eseguite sulle scorie d'altoforno (Electric Arc Furnace) e sugli aggregati di basalto vergine in cui è stato utilizzato come legante il bitume SBS Hard nelle due condizioni di prova "dry" e "wet".

Tipo di legante	Tipo di aggregato	Condizione di prova	nome provino	Ripetizione	BP [psig]	POTS [psi]	POTS [kPa]	Media POTS [kPa]	Dev.standard [kPa]	Tipo di rottura
SBS (T=160°C)	Scorie	DRY	SVHD1	1	47,7	464,18	3200,38	2991,98	383,43	coesiva
			SVHD2	2	37,3	362,77	2501,23			coesiva
			SVHD3	3	43,8	426,15	2938,20			coesiva
			SVHD4	4	41,9	407,62	2810,47			coesiva
			SVHD5	5	52,3	509,03	3509,62			coesiva
		WET	SVHW1	1	35,8	348,15	2400,39	2347,95	445,23	coesiva/ adesiva
			SVHW2	2	23,8	231,14	1593,67			coesiva/ adesiva
			SVHW3	3	37,1	360,82	2487,78			coesiva/ adesiva
			SVHW4	4	41,4	402,75	2776,86			coesiva/ adesiva
			SVHW5	5	37	359,85	2481,06			coesiva/ adesiva
	Basalto	DRY	BVHD1	1	58,7	571,43	3939,87	4004,41	202,94	coesiva
			BVHD2	2	64	623,11	4296,17			coesiva
			BVHD3	3	59,3	577,28	3980,21			coesiva
			BVHD4	4	60,6	589,96	4067,60			coesiva
			BVHD5	5	55,7	542,18	3738,19			coesiva
		WET	BVHW1	1	15,1	146,31	1008,80	1221,23	200,03	adesiva
			BVHW2	2	21,5	208,72	1439,05			adesiva
			BVHW3	3	20,5	198,97	1371,82			adesiva
			BVHW4	4	19	184,34	1270,98			adesiva
			BVHW5	5	15,2	147,29	1015,52			adesiva

Tabella 73 risultati prove BBS su scorie e basalto vergine

I grafici che verranno proposti di seguito riassumono in maniera sintetica i risultati riportati nella tabella mettendo a confronto i vari materiali.

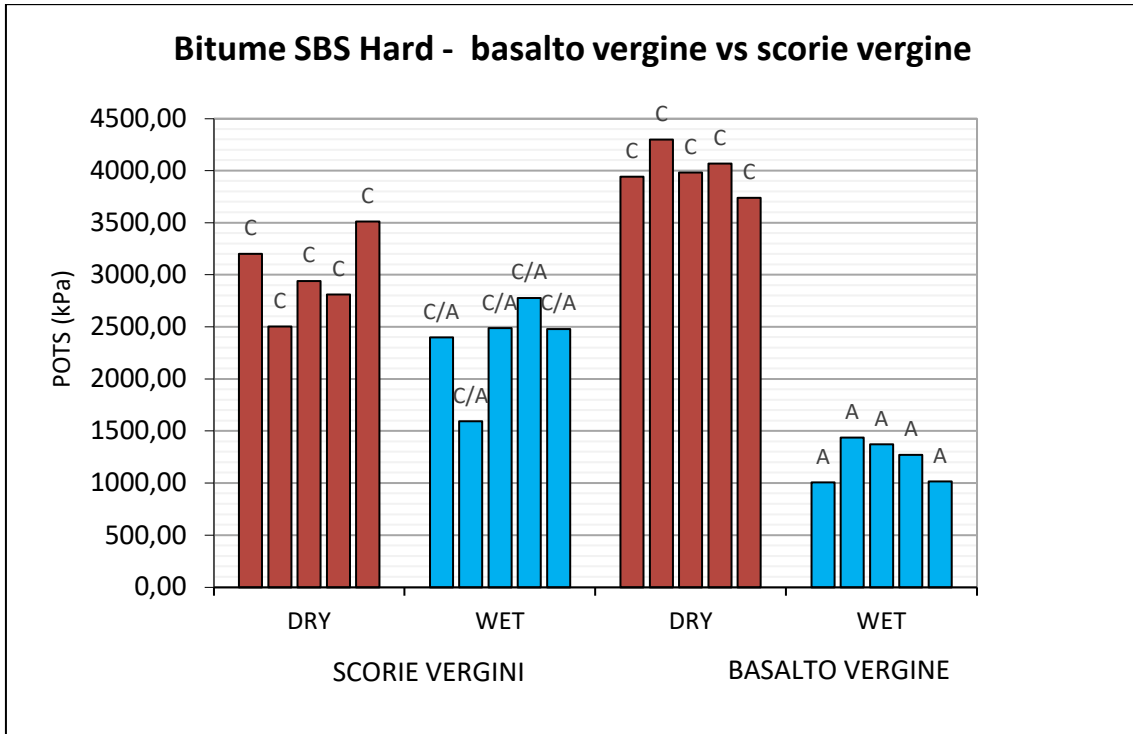


Figura 74 rappresentazione dei risultati ottenuti su scorie e basalto vergini con il bitume “SBS Hard”

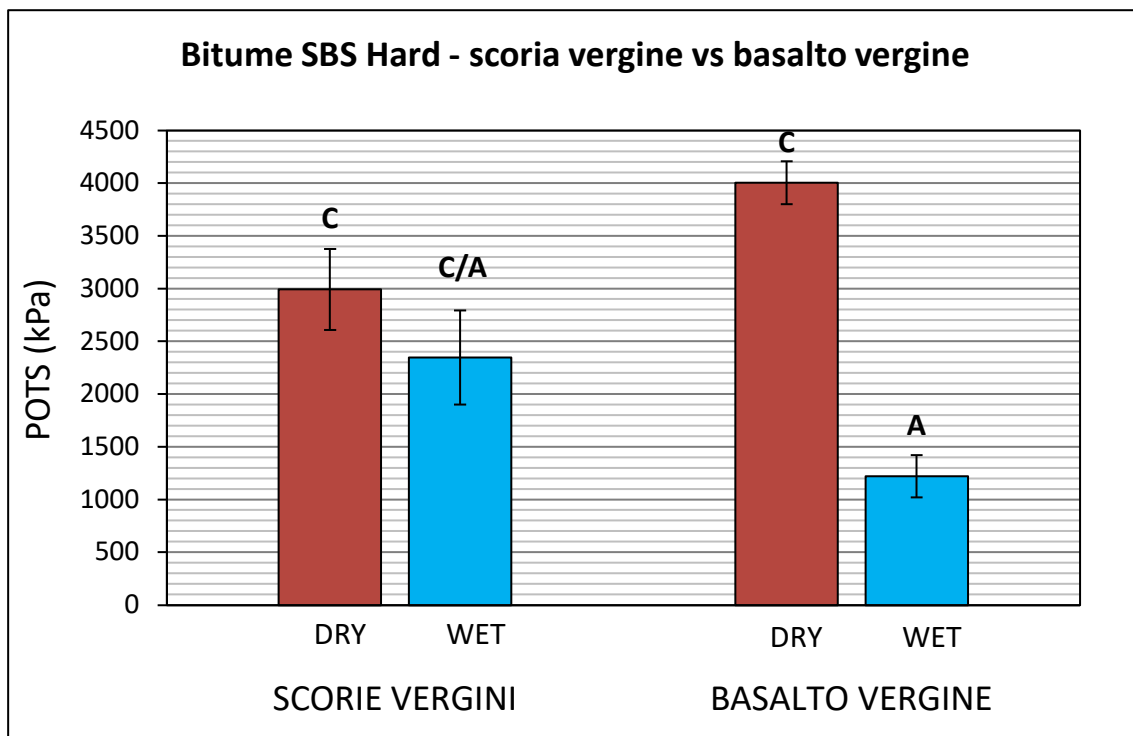


Figura 75 confronto tra scorie e basalto vergini in presenza di bitume SBS Hard

I grafici sopra mostrano i valori del POTS delle singole ripetizioni figura 74 e quelli meda figura 75 relativi alle prove BBS eseguite sugli aggregati di basalto e scorie

vergine utilizzando come legante il bitume SBS Hard nelle due condizioni di prova “dry e wet”.

Come si può osservare in condizioni “dry” il basalto mostra valori POTS superiori a quelli esibiti dalle scorie nelle medesime condizioni nonostante in entrambi i supporti si osservino rotture di tipo coesivo.

Questa tendenza potrebbe essere imputabile alla composizione mineralogica della scoria ed in particolare dalla presenza di alcune sostanze che interferiscono con il bitume penalizzando il legame di adesione.

Non disponendo di analisi chimiche approfondite su questo materiale si rimanda a studi successivi per valutare questo aspetto.

Passando ad analizzare le condizioni “wet”, invece, si vede che a parità di bitume la scoria tende ad avere un comportamento migliore rispetto al basalto, dove, i valori del POTS sono molto bassi e associati a rotture di tipo adesivo. Questo andamento, ricordiamo, che era stato osservato su tutte le prove eseguite sul basalto vergine con i bitumi “BB”, “BB+PC” e “BB+GC”.

Nelle scorie, inoltre, le rotture in condizioni “wet” sono ibride e questo potrebbe significare che in qualche la tessitura superficiale dell’aggregato in qualche modo migliora le prestazioni nelle prove in acqua.

Confrontando ciascuno dei due aggregati nelle due condizioni di prova asciutto/bagnato si vede come, nelle scorie, passando dalla condizione “dry” a quella “wet” i valori medi del POTS subiscano una riduzione di circa il 22%. Anche il basalto ha un andamento simile ma la riduzione è molto più accentuata e pari circa al 70%.

Quindi in conclusione possiamo dire che la scoria, pur essendo uno scarto di lavorazione industriale, possiede buone proprietà di adesione/coesione con il bitume SBS Hard soprattutto in acqua dove il suo comportamento vista anche la sua natura mineralogica tende ad essere simile a quella esibita dal calcare.

Concludiamo ora l’analisi andando a commentare i risultati dell’analisi di varianza Anova eseguita su questo gruppo di risultati.

Le variabili che vengono prese in considerazione in questo caso sono: il tipo di aggregato e il tipo di condizionamento ma non il tipo di bitume che è sempre lo stesso ovvero SBS Hard.

tipo di bitume	condizionamento	
	dry	wet
SBS	0,00080	0,00086

*Tabella 76 influenza del tipo di aggregato*

La tabella sopra mostra l'influenza del tipo di aggregato eseguito sul legame di adesione/coesione dei sistemi analizzati ed è stata costruita confrontando i valori del POTS misurati sulla scoria e sul basalto a parità di condizioni di prova.

Come si può osservare sia nelle condizioni “dry” che in quelle “wet” si ottengono valori del P-value < 0.05 da cui si deduce che il tipo di aggregato condiziona i risultati della prova.

Infine, passiamo ad analizzare l'influenza de tipo di condizionamento tramite la tabella sottostante che è stata ottenuta confrontando i valori del POTS ottenuti su ciascuno dei due tipo di aggregato nelle condizioni “dry” e “wet”.

tipo di bitume	p-value	
	calcare	basalto
SBS	0,03988	0,0000000204

*Tabella 77 influenza del tipo di condizionamento*

Nella tabella si vede che:

- Se prendiamo in considerazione il basalto vagine, il tipo di condizionamento influenza i risultati della prova e questo conferma quanto osservato nel grafico precedente in cui si vedeva che in condizione wet si ottenevano tutte rotture adesive con associati bassi valori del POTS.
- Anche sui provini di scoria il tipo di condizionamento influenza i risultati, infatti, si ottiene un valore del P-value < 0.05



## 4.6 AGGREGATI DA RICICLO – SCARTI DI RESINE INDUSTRIALI

### 4.6.1 Risultati sperimentali

Nella tabella riportata di seguito sono riassunti i risultati delle prove BBS eseguite sugli scarti di resine utilizzate nella produzione di lavelli e piani da cucina in cui è stato utilizzato come legante il bitume SBS Hard nelle due condizioni di prova “dry” e “wet”.

I tipi di resina utilizzati sono due, una chiara ed una scura, come illustrato nel capitolo 3 alla voce materiali.

Tipo di legante	Tipo di aggregato	Condizione di prova	nome provino	Ripetizione	BP [psig]	POTS [psi]	POTS [kPa]	Media POTS [kPa]	Dev.standard [kPa]	Tipo di rottura
SBS (T=160 °C)	Resina chiara vergine (T =160°C)	DRY	RVHD1	1	48,7	473,93	3267,61	3188,28	149,60	adesiva
			RVHD2	2	47,9	466,13	3213,83			adesiva/coesiva
			RVHD3	3	50,3	489,53	3375,17			adesiva
			RVHD4	4	46,1	448,58	3092,82			adesiva
			RVHD5	5	44,6	433,95	2991,98			adesiva/coesiva
		WET	RVHW1	1	41,5	403,72	2783,58	3000,05	373,53	adesiva/coesiva
			RVHW2	2	40,9	397,87	2743,24			adesiva/coesiva
			RVHW3	3	50,2	488,55	3368,45			adesiva/coesiva
			RVHW4	4	39,7	386,17	2662,57			adesiva/coesiva
			RVHW5	5	51,3	499,28	3442,40			adesiva
	Resina scura vergine (T =160°C)	DRY	LVHD1	1	45,4	441,75	3045,76	2963,75	80,73	adesiva
			LVHD2	2	44,6	433,95	2991,98			adesiva
			LVHD3	3	44,6	433,95	2991,98			adesiva
			LVHD4	4	42,2	410,55	2830,64			adesiva
			LVHD5	5	44,1	429,07	2958,37			adesiva
		WET	LVHW1	1	48,7	473,93	3267,61	3548,62	230,80	adesiva
			LVHW2	2	52,4	510,00	3516,35			adesiva
			LVHW3	3	51,4	500,25	3449,12			adesiva/coesiva
			LVHW4	4	58	564,61	3892,82			adesiva
			LVHW5	5	53,9	524,63	3617,19			adesiva/coesiva

Tabella 78 risultati prove BBS su resine

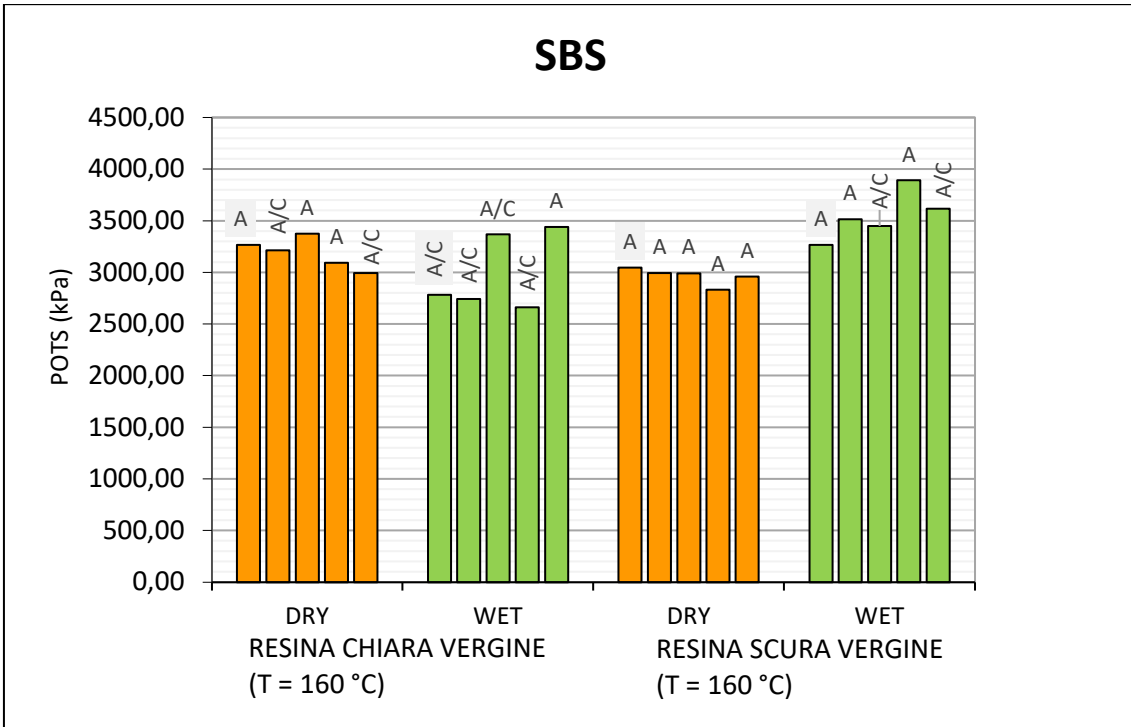


Figura 79 rappresentazione dei risultati ottenuti su resine di riciclo con il bitume "SBS Hard"

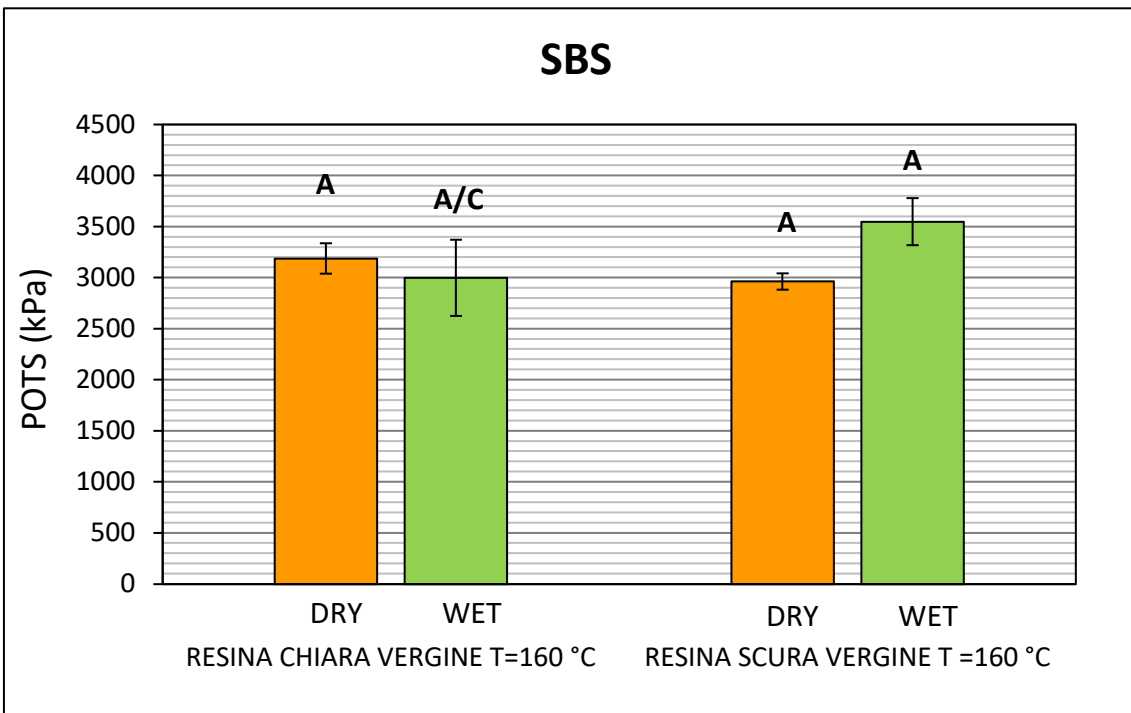


Figura 80 confronto tra resine in presenza di bitume SBS Hard

Nei due grafici di figura. 79 e figura 80 vengono riportati rispettivamente i valori del POTS delle singole ripetizioni e quelli medi ottenuti sui supporti costituiti dagli scarti di resine i cui è stato utilizzato come legante il bitume SBS Hard nelle due condizioni di prova “dry e wet”.

Prendendo in esame le prove “dry” si vede che i due tipi di resine presentano valori medi di POTS molto simili tra loro dell’ordine di 3000÷3200 kPa a fronte di rotture tutte di tipo adesivo che ci suggeriscono che questo il bitume non lega bene con questo tipo di materiali.

Questo comportamento potrebbe essere legato alla composizione mineralogica dell’aggregato che nel nostro caso è composto per il 70% da silicio e per il restante 30% da resina, pertanto, la presenza del silicio potrebbe influenzare il legame di adesione con il bitume indebolendolo.

È interessante osservare come tali valori siano simili a quelli raggiunti dalle scorie nelle medesime condizioni di prova dove però si registravano rotture di tipo coesivo.

Passando ad analizzare le condizioni “wet” si nota che tra i due tipi di resine testate si sono raggiunti risultati migliori in quella scura pur ottenendo rotture di tipo adesivo.

I valori medi del POTS nelle due condizioni di prova “dry” e “wet”, per ciascuno dei due tipi di resine, sono confrontabili tra loro e questo ci suggerisce che l’acqua non interferisce o comunque interagisce in minima parte sui legami di adesione /coesione sviluppati dal bitume e questo trova giustificazione nel fatto che per loro natura questi materiali sono impermeabili e quindi non permettono all’acqua di raggiungere l’interfaccia bitume aggregato.

In conclusione, possiamo dire che questi materiali non legano bene con il bitume, infatti, si ottengono prevalentemente rotture adesive e quindi non risultano adatti ad essere utilizzati come aggregati per le miscele di conglomerato bituminoso.

Ricordiamo inoltre che queste resine presentano anche delle criticità legate alla temperatura illustrate nel capitolo 3 che ribadiscono quanto appena detto.

Un possibile impiego per questi materiali potrebbe essere nei conglomerati bituminosi a freddo.

## 4.7 BITUMI MODIFICATI CON LIGNINA

### 4.7.1 Risultati sperimentali

Le tabelle proposte di seguito riassumono i risultati delle prove BBS eseguite su aggregati vergine di calare e basalto utilizzando leganti modificati con lignina.

Tali bitumi, a differenza di quelli modificati con i compound polimerici visti in precedenza, sono stati ottenuti sostituendo una porzione di bitume pari al 30% con lignina, un agente chimico naturale al fine di ottenere un legante meno inquinante e quindi più sostenibile dal punto di vista ambientale. I bitumi che verranno presi in considerazione nello specifico sono: 70/100 + 30% di lignina tipo “S”; 100/150 + 30% di lignina tipo “B”; 100/150 + 30% di lignina tipo “M” e SBS Hard + 10% di lignina tipo “S”.

I risultati ottenuti poi verranno confrontati con quelli raggiunti dai bitumi base utilizzati per confezionare quelli modificati con lignina che nel caso specifico sono 50/71 ,70/100 ,100/150 e SBS hard.

Anche in questo caso verranno analizzate le due condizioni di prova “dry” e “wet”.

Tipo di legante	Tipo di aggregato	Condizione di prova	nome provino	Ripetizione	BP [psig]	POTS [psi]	POTS [kPa]	Media POTS [kPa]	Dev.standard [kPa]	Tipo di rottura
Bitume 70/100 + 30% di lignina tipo “ S” (T=160°C)	Calcare	DRY	CVSD1	1	24	233,09	1607,11	1632,66	231,19	coesiva/adesiva
			CVSD2	2	22,4	217,49	1499,55			coesiva
			CVSD3	3	26,5	257,47	1775,18			coesiva
			CVSD4	4	20,1	195,07	1344,93			coesiva
			CVSD5	5	28,9	280,87	1936,52			coesiva
		WET	CVSW1	1	26,1	253,57	1748,29	1693,16	132,28	coesiva
			CVSW2	2	23,8	231,14	1593,67			coesiva
			CVSW3	3	24,7	239,92	1654,17			coesiva
			CVSW4	4	28,3	275,02	1896,19			coesiva
			CVSW5	5	23,5	228,22	1573,50			coesiva
	Basalto	DRY	BVSD1	1	24,9	241,87	1667,62	1542,58	94,31	coesiva
			BVSD2	2	22,6	219,44	1513,00			coesiva
			BVSD3	3	22,9	222,37	1533,17			coesiva
			BVSD4	4	23,7	230,17	1586,95			coesiva
			BVSD5	5	21,1	204,82	1412,16			coesiva
		WET	BVSW1	1	15,8	153,14	1055,86	1170,14	149,72	adesiva
			BVSW2	2	16,8	162,89	1123,08			coesiva/adesiva
			BVSW3	3	15,2	147,29	1015,52			coesiva/adesiva
			BVSW4	4	20,1	195,07	1344,93			coesiva
			BVSW5	5	19,6	190,19	1311,32			coesiva

Tabella 81 risultati sperimentali prove BBS eseguite sui bitumi modificati con lignina

Tipo di legante	Tipo di aggregato	Condizione di prova	nome provino	Ripetizione	BP [psig]	POTS [psi]	POTS [kPa]	Media POTS [kPa]	Dev.standard [kPa]	Tipo di rottura
Bitume 100/150 + 30% di lignina tipo " B" (T=154°C)	Calcare	DRY	CVBD1	1	29	281,84	1943,25	1833,00	132,13	coesiva/adesiva
			CVBD2	2	28,5	276,97	1909,63			coesiva
			CVBD3	3	27,7	269,17	1855,85			coesiva
			CVBD4	4	24	233,09	1607,11			coesiva
			CVBD5	5	27,6	268,19	1849,13			coesiva
		WET	CVBW1	1	24,6	238,94	1647,45	1570,81	144,47	coesiva
			CVBW2	2	24,2	235,04	1620,56			coesiva
			CVBW3	3	26	252,59	1741,57			coesiva
			CVBW4	4	20,8	201,89	1391,99			coesiva
			CVBW5	5	21,7	210,67	1452,49			coesiva
	Basalto	DRY	BVBD1	1	26,7	259,42	1788,63	1750,98	84,98	coesiva
			BVBD2	2	27	262,34	1808,79			coesiva
			BVBD3	3	27	262,34	1808,79			coesiva
			BVBD4	4	26	252,59	1741,57			coesiva
			BVBD5	5	24	233,09	1607,11			coesiva
		WET	BVBW1	1	19,8	192,14	1324,76	1210,48	103,28	coesiva
			BVBW2	2	16,8	162,89	1123,08			coesiva
			BVBW3	3	19,5	189,22	1304,59			coesiva
			BVBW4	4	18	174,59	1203,76			coesiva/adesiva
			BVBW5	5	16,4	158,99	1096,19			adesiva
Bitume 100/150 + 30% di lignina tipo " M" (T=143°C)	Calcare	DRY	CVMD1	1	27,7	269,17	1855,85	1923,08	129,31	coesiva
			CVMD2	2	31,4	305,25	2104,59			coesiva
			CVMD3	3	30	291,59	2010,47			coesiva
			CVMD4	4	26,8	260,39	1795,35			coesiva
			CVGD5	5	27,6	268,19	1849,13			coesiva
		WET	CVMW1	1	27,2	264,29	1822,24	1658,21	96,21	coesiva
			CVMW2	2	23,4	227,24	1566,78			coesiva
			CVMW3	3	24,4	236,99	1634,00			coesiva
			CVMW4	4	24,4	236,99	1634,00			coesiva
			CVMW5	5	24,4	236,99	1634,00			coesiva
	Basalto	DRY	BVMD1	1	26,9	261,37	1802,07	1819,55	91,26	coesiva
			BVMD2	2	27,3	265,27	1828,96			coesiva
			BVMD3	3	28,4	275,99	1902,91			coesiva
			BVMD4	4	28,2	274,04	1889,47			coesiva
			BVMD5	5	25	242,84	1674,34			coesiva
		WET	BVMW1	1	16,7	161,91	1116,36	1201,07	95,38	coesiva
			BVMW2	2	17,6	170,69	1176,86			coesiva
			BVMW3	3	17,7	171,66	1183,59			coesiva
			BVMW4	4	17,4	168,74	1163,42			coesiva
			BVMW5	5	20,4	197,99	1365,10			coesiva

Tabella 82 risultati sperimentali prove BBS eseguite sui bitumi modificati con lignina

Tipo di legante	Tipo di aggregato	Condizione di prova	nome provino	Ripetizione	BP [psig]	POTS [psi]	POTS [kPa]	Media POTS [kPa]	Dev.standard [kPa]	Tipo di rottura
Bitume base modifica 70/100 (T=133°C)	Calcare	DRY	CVND1	1	24,8	240,89	1660,90	1698,54	83,37	coesiva
			CVND2	2	24,3	236,02	1627,28			coesiva
			CVND3	3	24,3	236,02	1627,28			coesiva
			CVND4	4	26,7	259,42	1788,63			coesiva
			CVND5	5	26,7	259,42	1788,63			coesiva
		WET	CVNW1	1	24,3	236,02	1627,28	1613,84	103,28	coesiva
			CVNW2	2	25,5	247,72	1707,95			coesiva
			CVNW3	3	21,9	212,62	1465,94			coesiva
			CVNW4	4	25,5	247,72	1707,95			coesiva
			CVNW5	5	23,3	226,27	1560,06			coesiva
	Basalto	DRY	BVND1	1	26,4	256,49	1768,46	1698,54	131,62	coesiva/adesiva
			BVND2	2	27,1	263,32	1815,52			coesiva
			BVND3	3	26,8	260,39	1795,35			coesiva
			BVND4	4	22,9	222,37	1533,17			coesiva
			BVND5	5	23,6	229,19	1580,22			coesiva
		WET	BVNW1	1	13,2	127,79	881,07	980,56	146,47	adesiva
			BVNW2	2	13,3	128,76	887,79			adesiva
			BVNW3	3	12,8	123,89	854,18			adesiva
			BVNW4	4	16,8	162,89	1123,08			adesiva/coesiva
			BVNW5	5	17,3	167,76	1156,70			coesiva
Bitume base modifica 100/150 (T=116°C)	Calcare	DRY	CVOD1	1	28,5	276,97	1909,63	1722,74	142,64	coesiva
			CVOD2	2	25,9	251,62	1734,84			coesiva
			CVOD3	3	26,3	255,52	1761,74			coesiva
			CVOD4	4	25,3	245,77	1694,51			coesiva
			CVOD5	5	22,6	219,44	1513,00			coesiva
		WET	CVOW1	1	26,9	261,37	1802,07	1486,11	192,98	coesiva
			CVOW2	2	22,7	220,42	1519,72			coesiva
			CVOW3	3	21,5	208,72	1439,05			coesiva
			CVOW4	4	19,9	193,12	1331,49			coesiva
			CVOW5	5	20	194,09	1338,21			coesiva
	Basalto	DRY	BVOD1	1	27,9	271,12	1869,30	1767,11	134,07	coesiva
			BVOD2	2	23,5	228,22	1573,50			coesiva
			BVOD3	3	25,9	251,62	1734,84			coesiva
			BVOD4	4	26	252,59	1741,57			coesiva
			BVOD5	5	28,6	277,94	1916,36			coesiva
		WET	BVOW1	1	14	135,59	934,85	925,44	29,53	coesiva/adesiva
			BVOW2	2	13,5	130,71	901,24			coesiva/adesiva
			BVOW3	3	13,3	128,76	887,79			coesiva/adesiva
			BVOW4	4	14,2	137,54	948,29			coesiva/adesiva
			BVOW5	5	14,3	138,51	955,02			coesiva/adesiva

Tabella 83 risultati sperimentali prove BBS eseguite sui bitumi modificati con lignina

Tipo di legante	Tipo di aggregato	Condizione di prova	nome provino	Ripetizione	BP [psig]	POTS [psi]	POTS [kPa]	Media POTS [kPa]	Dev.standard [kPa]	Tipo di rottura
Bitume base modifica SBS Hard (T=160°C)	Calcare	DRY	CVTD1	1	41,7	405,67	2797,02	2556,35	224,55	coesiva
			CVTD2	2	40,7	395,92	2729,80			coesiva
			CVTD3	3	33,6	326,70	2252,49			coesiva
			CVTD4	4	38,6	375,45	2588,62			coesiva
			CVTD5	5	36	350,10	2413,83			coesiva
		WET	CVTW1	1	33,6	326,70	2252,49	2161,06	208,11	coesiva
			CVTW2	2	29,5	286,72	1976,86			coesiva
			CVTW3	3	28,4	275,99	1902,91			coesiva
			CVTW4	4	34,3	333,52	2299,55			coesiva
			CVTW5	5	35,4	344,25	2373,50			coesiva
	Basalto	DRY	BVTD1	1	42,9	417,37	2877,70	2805,09	119,83	coesiva
			BVTD2	2	40,5	393,97	2716,35			coesiva
			BVTD3	3	42,7	415,42	2864,25			coesiva
			BVTD4	4	43,6	424,20	2924,75			coesiva
			BVTD5	5	39,4	383,25	2642,40			coesiva
		WET	BVTW1	1	26,7	259,42	1788,63	1601,74	277,12	coesiva
			BVTW2	2	21	203,84	1405,43			adesiva
			BVTW3	3	18,1	175,56	1210,48			coesiva/adesiva
			BVTW4	4	27,1	263,32	1815,52			adesiva
			BVTW5	5	26,7	259,42	1788,63			coesiva
Bitume SBS Hard + 10% di lignina tipo " S" (T=162°C)	Calcare	DRY	CVRD1	1	39,1	380,32	2622,23	2491,82	143,76	coesiva
			CVRD2	2	36,2	352,05	2427,28			coesiva
			CVRD3	3	34,5	335,47	2312,99			coesiva
			CVRD4	4	39,6	385,20	2655,85			coesiva
			CVRD5	5	36,4	354,00	2440,72			coesiva
		WET	CVRW1	1	40,6	394,95	2723,07	2374,87	295,85	coesiva
			CVRW2	2	35,1	341,32	2353,33			coesiva
			CVRW3	3	38,9	378,37	2608,79			coesiva
			CVRW4	4	32,6	316,95	2185,26			coesiva
			CVRW5	5	29,9	290,62	2003,75			coesiva
	Basalto	DRY	BVRD1	1	40	389,10	2682,74	2649,13	135,62	coesiva
			BVRD2	2	36	350,10	2413,83			coesiva
			BVRD3	3	41	398,85	2749,96			coesiva
			BVRD4	4	39,8	387,15	2669,29			coesiva
			BVRD5	5	40,7	395,92	2729,80			coesiva
		WET	BVRW1	1	24,8	240,89	1660,90	1740,22	66,96	adesiva
			BVRW2	2	26,4	256,49	1768,46			adesiva
			BVRW3	3	25,2	244,79	1687,79			adesiva
			BVRW4	4	27,3	265,27	1828,96			adesiva
			BVRW5	5	26,2	254,54	1755,01			adesiva

Tabella 84 risultati sperimentali prove BBS eseguite sui bitumi modificati con lignina

Tipo di legante	Tipo di aggregato	Condizione di prova	nome provino	Ripetizione	BP [psig]	POTS [psi]	POTS [kPa]	Media POTS [kPa]	Dev.standard [kPa]	Tipo di rottura
Bitume 50/70 (T=132°C)	Calcare	DRY	CVRD1	1	39,1	380,32	2622,23	2491,82	143,76	coesiva
			CVRD2	2	36,2	352,05	2427,28			coesiva
			CVRD3	3	34,5	335,47	2312,99			coesiva
			CVRD4	4	39,6	385,20	2655,85			coesiva
			CVRD5	5	36,4	354,00	2440,72			coesiva
		WET	CVRW1	1	40,6	394,95	2723,07	2374,84	295,85	coesiva
			CVRW2	2	35,1	341,32	2353,33			coesiva
			CVRW3	3	38,9	378,37	2608,79			coesiva
			CVRW4	4	32,6	316,95	2185,26			coesiva
			CVRW5	5	29,9	290,62	2003,75			coesiva
	Basalto	DRY	BVRD1	1	40	389,10	2682,74	2649,13	135,62	coesiva
			BVRD2	2	36	350,10	2413,83			coesiva
			BVRD3	3	41	398,85	2749,96			coesiva
			BVRD4	4	39,8	387,15	2669,29			coesiva
			BVRD5	5	40,7	395,92	2729,80			coesiva
		WET	BVRW1	1	24,8	240,89	1660,90	1740,22	66,96	coesiva
			BVRW2	2	26,4	256,49	1768,46			adesiva
			BVRW3	3	25,2	244,79	1687,79			coesiva/adesiva
			BVRW4	4	27,3	265,27	1828,96			adesiva
			BVRW5	5	26,2	254,54	1755,01			coesiva

Tabella 85 risultati sperimentali prove BBS eseguite sui bitumi modificati con lignina

I grafici mostrati di seguito riassumono, tramite degli istogrammi, i valori del POTS misurati in ciascuna ripetizione sui vari tipi di bitumi testati.

Per ciascun materiale analizzato verranno prese in considerazione due tipi di aggregato ovvero calcare e basalto entrambi in condizioni vergine e due condizioni di prova “dry” e “wet”.

A seguire saranno proposti grafici riassuntivi che fanno riferimento ai valori medi ottenuti delle cinque ripetizioni per ciascun materiale testato.



#### 4.7.2 Bitume 70/100 vs 70/100 modificato con lignina di tipo "S"

➤ Bitume 70/100

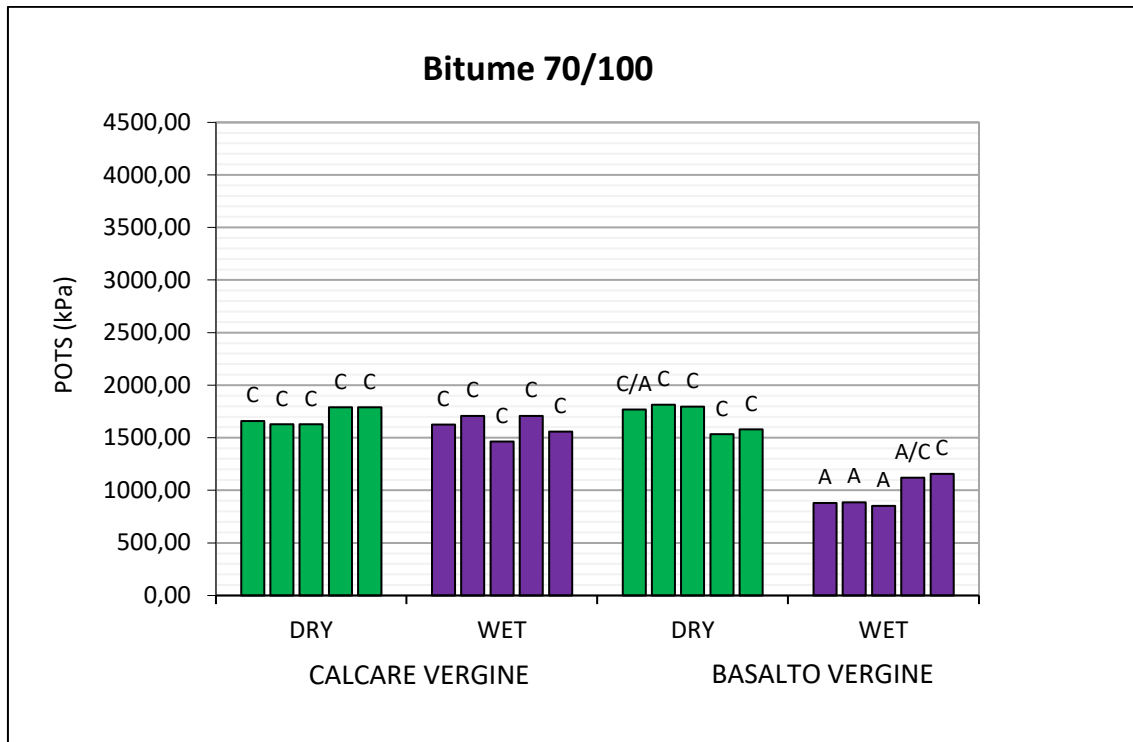


Figura86 rappresentazione dei risultati ottenuti sugli aggregati vergine con il bitume 70/100

Il grafico di figura 86 mostra i risultati delle prove BBS eseguite sul calcare e sul basalto vergini utilizzando come legante il bitume 70/100 non modificato

È interessante notare che in condizioni asciutte i valori del POTS misurati sul calcare e sul basalto sono simili tra loro e caratterizzati da rotture prevalentemente coesive.

Passando ad analizzare le condizioni bagnate si vede subito che per gli aggregati di basalto si ha una riduzione dei valori del POTS, inoltre le rotture non sono di tipo coesivo ma prevalentemente adesive.

Negli aggregati di calcare l'immersine in acqua non sembra penalizzare i risultati della prova cosa che invece accade sugli aggregati di basalto dove si osserva una riduzione dei valori medi del POTS di circa il 38% rispetto alla condizione asciutta.

➤ Bitume 70/100 con il 30% di lignina tipo "S"

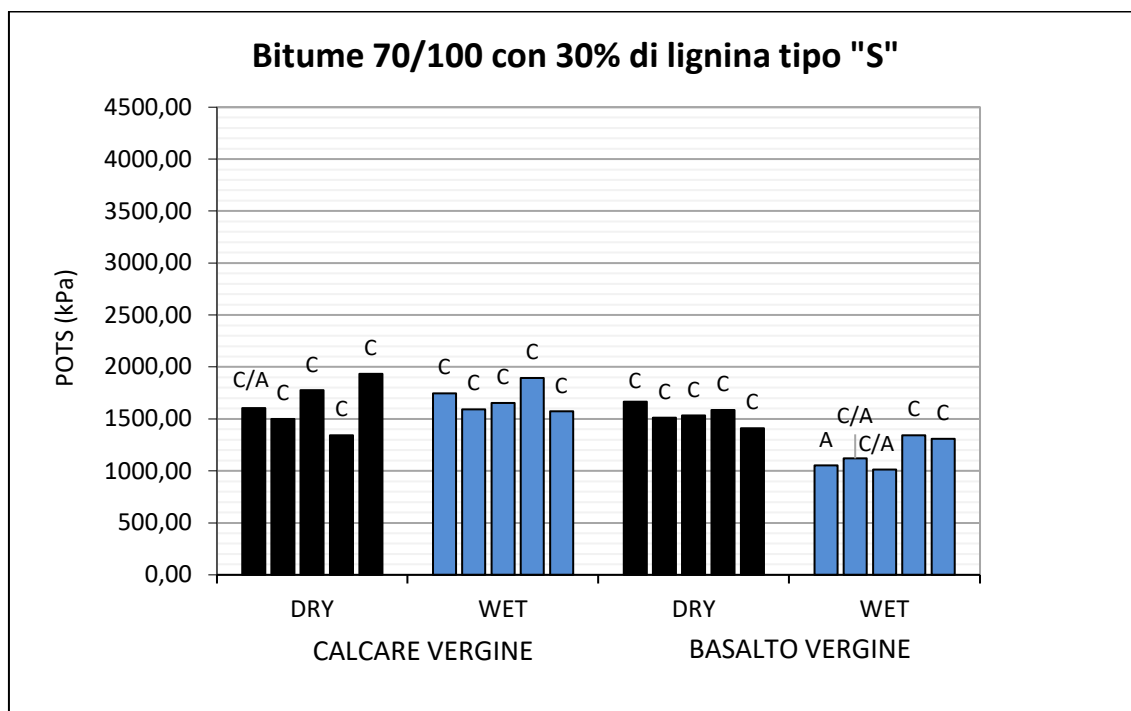


Figura 87 rappresentazione dei risultati ottenuti sugli aggregati vergine con il bitume 70/100 modificato con lignina tipo "S"

Il grafico di figura 87 mostra i risultati delle prove BBS eseguite sul calcare e sul basalto vergini utilizzando come legante il bitume 70/100 in cui è stata aggiunta, in sostituzione del legante, una percentuale di lignina di tipo "S" pari al 30%.

Analizzando il grafico si vede come in condizioni "dry" sul calcare che sul basalto le rotture all'interfaccia siano prevalentemente di tipo coesivo e caratterizzate da valori del POTS di circa 1500 Kpa.

In condizioni "wet" sugli aggregati di calcare si osservano rotture coesive caratterizzate da valori del POTS confrontabili con quelli riscontrati in condizioni asciutte, mentre sugli aggregati di basalto le rotture tendono ad essere in parte coesive ed in parte ibride ovvero intermedie tra coesive e adesive e con valori del POTS mediamente inferiori a tutti gli altri casi.

Nel basalto l'immersione in acqua produce una riduzione dei valori medi del POTS di circa il 25% cosa che invece non accade nel calcare.

#### 4.7.2.1 Influenza della lignina di tipo “S” su aggregati di calcare

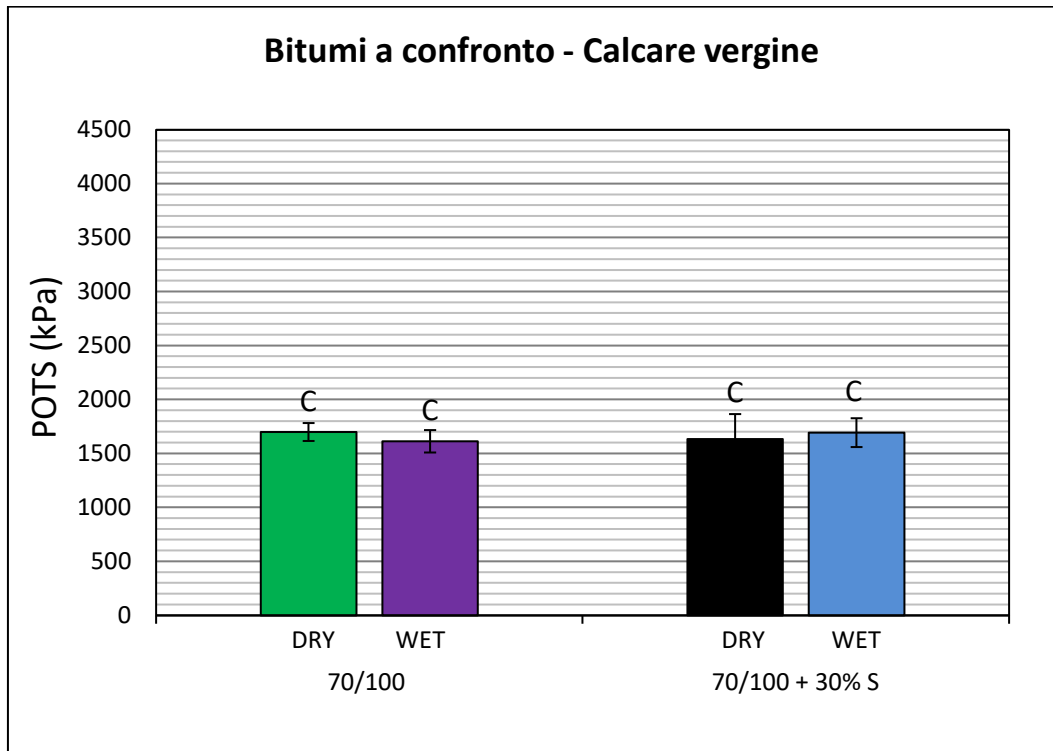


Figura 88 confronto tra bitume 70/100 base e 70/100 modificato con lignina tipo “S” nelle condizioni “dry” e “wet” su aggregati calcarei

Nella figura 88 sono stati messi a confronto i valori medi del POTS ottenuti nelle due condizioni di prova “dry” e “wet” sui provini di calcare confezionati con il bitume 70/100 non modificato e su quelli realizzati con lo stesso bitume in cui il 30% del legante è stato sostituito con lignina di tipo “S”.

Prendendo in esame le condizioni asciutte si vede che in entrambi i sistemi i valori medi del POTS sono molto simili tra loro e questo ci suggerisce che in questa condizione di prova l’aggiunta della lignina non sembra penalizzare la risposta del sistema in termini di proprietà adesive/coesive.

Anche in condizioni bagnate la risposta dei due sistemi è molto simile anzi nei provini confezionati con lignina il valore medio del POTS risulta essere leggermente superiore rispetto a quello ottenuto nei provini confezionati con il bitume non modificato.

In tutti i casi analizzati sono state riscontrate rotture di tipo coesivo e questo ci suggerisce che questi due tipi di leganti non presentano criticità in termini di adesione all’interfaccia con l’aggregato che ricordiamo essere di tipo calcareo.

A parità di tipo di legante inspiegato si vede che, nei provini confezionati con il bitume 70/100, l'immersione in acqua penalizza leggermente i valori medi del POTS cosa che invece non accade nei provini confezionati con il bitume 70/100m + 30% "S" dove si vede che nelle prove "wet" i valori medi del POTS risultano essere addirittura leggermente superiori rispetto a quelli riscontrati nelle prove "dry".

In conclusione, possiamo affermare che, nel caso di aggerati calcarei l'impiego di lignina di tipo "S" in sostituzione del 30% del bitume 70/100 non sembra penalizzare la risposta del sistema in termini di adesione /coesione.

Di seguito si riporta l'analisi ANOVA sull'aggregato di calcare vergine.

calcare			
dry		wet	
tipi di bitume	p-value	tipi di bitume	p-value
70/100   70/100+30% S	0,5655	70/100   70/100+30% S	0,3214

*Tabella 89 influenza del tipo di bitume su aggregati di calcare vergine*

La tabella 89 mostra i risultati ottenuti confrontando i valori del POTS (5 ripetizioni) ricavati con il bitume 70/100 e con il 70/100 in cui è stata aggiunta lignina di tipo "S" a parità di aggregato (calcare vergine) e di tipologia di condizionamento ("dry" o "wet"). Come si può osservare sia in condizioni asciutte che in quelle bagnate il valore del p-value risulta essere > 0.05 e questo ci suggerisce che i due campioni di dati messi a confronto sono confrontabili. Questo ci conferma quanto avevamo avuto modo di apprezzare nel grafico precedente ovvero che l'aggiunta di lignina non penalizza in alcun modo la risposta del sistema in termini di adesione/coesione.

#### 4.7.2.2 Influenza della lignina di tipo “S” su aggregati di basalto

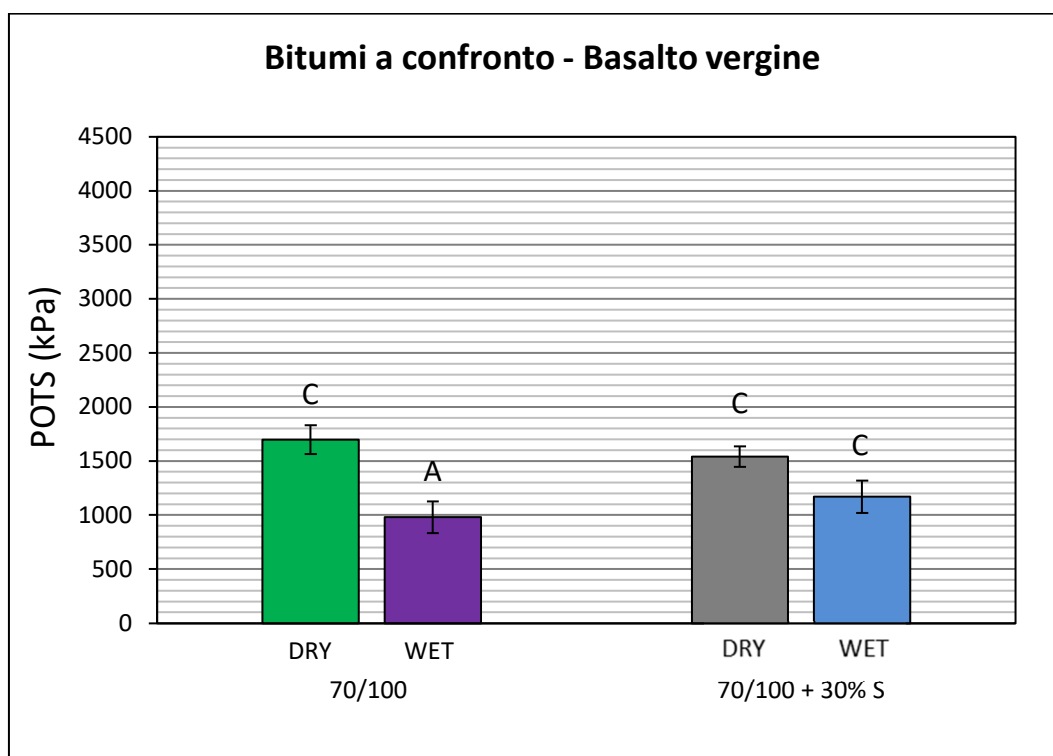


Figura 90 confronto tra bitume 70/100 base e 70/100 modificato con lignina tip “S” nelle condizioni “dry” e “wet” su aggregati basaltici

Nella figura 90 sono stati messi a confronto i valori medi del POTS ottenuti nelle due condizioni di prova “dry” e “wet” sui provini di basalto confezionati con il bitume 70/100 non modificato e su quelli realizzati con lo stesso bitume in cui il 30% del legante è stato sostituito con lignina di tipo “S”.

Se prendiamo in esame le condizioni asciutte vediamo che a fronte di rotture di tipo coesivo i valori medi del POTS misurati sui provini confezionati con il bitume 70/100 sono confrontabili con quelli ottenuti nei provini confezionati con il bitume 70/100 + 30% “S”. Questo ci fa ipotizzare che in questa condizione l’aggiunta di lignina non penalizza eccessivamente il sistema.

In condizioni bagnate, invece, i provini confezionati con il bitume 70/100 tendono ad esibire valori medi del POTS più bassi di circa il 16% rispetto quelli raggiunti nei provini realizzati con bitume 70/100 +30%” S” e quindi sembra che l’aggiunta di lignina migliori le performance del sistema.

A parità di tipologia di legante impiegato si vede che:

- Nei provini confezionati con il bitume 70/100 l'immersione in acqua produce rotture di tipo adesivo nei provini "wet" e coesive in quelli "dry", inoltre, i valori medi del POTS misurati in condizioni bagnate risultano essere inferiori di circa il 38% rispetto alla condizione asciutta.
- Nei provini confezionati con il bitume 70/100 + 30 % "S" l'immersione in acqua produce rotture tutte di tipo coesivo e passando dalla condizione asciutta a quella bagnata i valori medi del POTS subiscono una riduzione che si attesta intorno al 24%.

In conclusione, i dati misurati ribadiscono quanto precedentemente riscontrato sugli aggregati calcarei ovvero che l'utilizzo della lignina non sembra causare criticità in termini di proprietà di adesione/coesione del sistema.

Di seguito si riporta l'analisi ANOVA sull'aggregato di basalto vergine.

basalto			
dry		wet	
tipi di bitume	p-value	tipi di bitume	p-value
70/100 vs 70/100+30% S	0,0634	70/100 vs 70/100+30% S	0,0766

*Tabella 91 influenza del tipo di bitume su aggregati di basalto vergine*

La tabella 91 mostra i risultati ottenuti confrontando i valori del POTS (5 ripetizioni) ricavati con il bitume 70/100 e con il 70/100 in cui è stata aggiunta lignina di tipo "S" a parità di aggregato (basalto vergine) e di tipologia di condizionamento ("dry" o "wet").

Si vede subito che sia in condizioni asciutte che in quelle bagnate il valore del p-value risulta essere  $> 0.05$

Questo sostanzialmente ci conferma quanto affermato sopra ovvero che anche sui supporti di basalto l'aggiunta di lignina non influisce negativamente sulle proprietà adesive/coesive del sistema.

Vogliamo valutare ora, dal punto di vista statistico, l'effetto del condizionamento in acqua sui provini di calcare e su quelli di basalto in presenza dei bitumi 70/100 e 70/100 + 30% "S".

La seguente tabella mostra l'influenza del tipo di condizionamento "dry" e "wet" sul legame di adesione ed è stata ottenuta confrontando i valori del POTS dei campioni ottenuti nelle due condizioni asciutto bagnato a parità di tipo di aggregato e di tipo di bitume impiegato.

tipo di bitume	p-value	
	calcare	basalto
70/100	0,191412	0,0000380948
70/100 +30 %"S"	0,625217	0,0015287234

*Tabella 92 influenza del tipo di condizionamento (dry e wet) a parità di aggregato e di bitume*

Dalla tabella 92 osserviamo che nei provini confezionati con i supporti di calcare, indipendentemente dal tipo di bitume utilizzato, il condizionamento in acqua non produce effetti rilevanti sul sistema, infatti sia che usiamo il bitume 70/100 che quello modificato con lignina di tipo "S", il p-value calcolato risulta essere sempre maggiore di 0.05 a dimostrazione del fatto che in questa condizione i due sistemi sono equivalenti.

Diversamente passando ad analizzare i supporti di basalto si vede come in tutti i casi il p-value sia significativamente al di sotto della soglia di 0.05 evidenziando che su questo aggregato l'acqua influisce negativamente provocando una riduzione più o meno marcata dei valori del POTS.

#### 4.7.3 Bitume 100/150 vs bitume 100/150 modificato con lignine di tipo "B" ed "M"

➤ *Bitume 100/150*

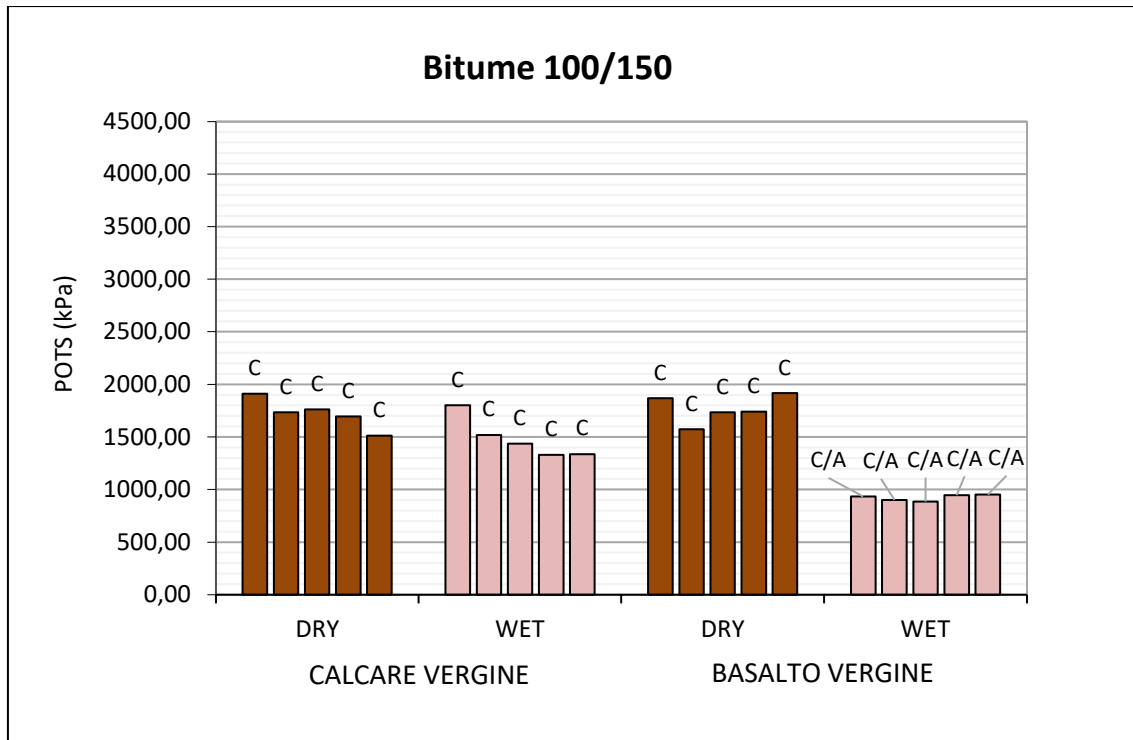


Figura 43 rappresentazione dei risultati ottenuti sugli aggregati vergine con il bitume 100/150

Il grafico di figura 93 mostra i risultati delle prove BBS eseguite sul calcare e sul basalto vergini utilizzando come legante il bitume 100/150 non modificato

Nelle condizioni asciutte sia sul calcare che sul basalto si ottengono rotture di tipo coesivo caratterizzate da valori del POTS dell'ordine di 1700 Kpa

In condizioni bagnate le rotture tendono ad essere coesive negli aggregati di calcare mentre mutano in quelle ibride ovvero intermedie tra quelle coesive e quelle adesive negli aggregati di basalto dove i valori del POTS misurati sono inferiori

A parità di aggregato l'immersione in acqua produce una riduzione del valore medio del POTS di circa il 13% negli aggregati calcarei e di circa il 48% in quelli basaltici.



➤ *Bitume 100/150 con il 30% di lignina tipo "B"*

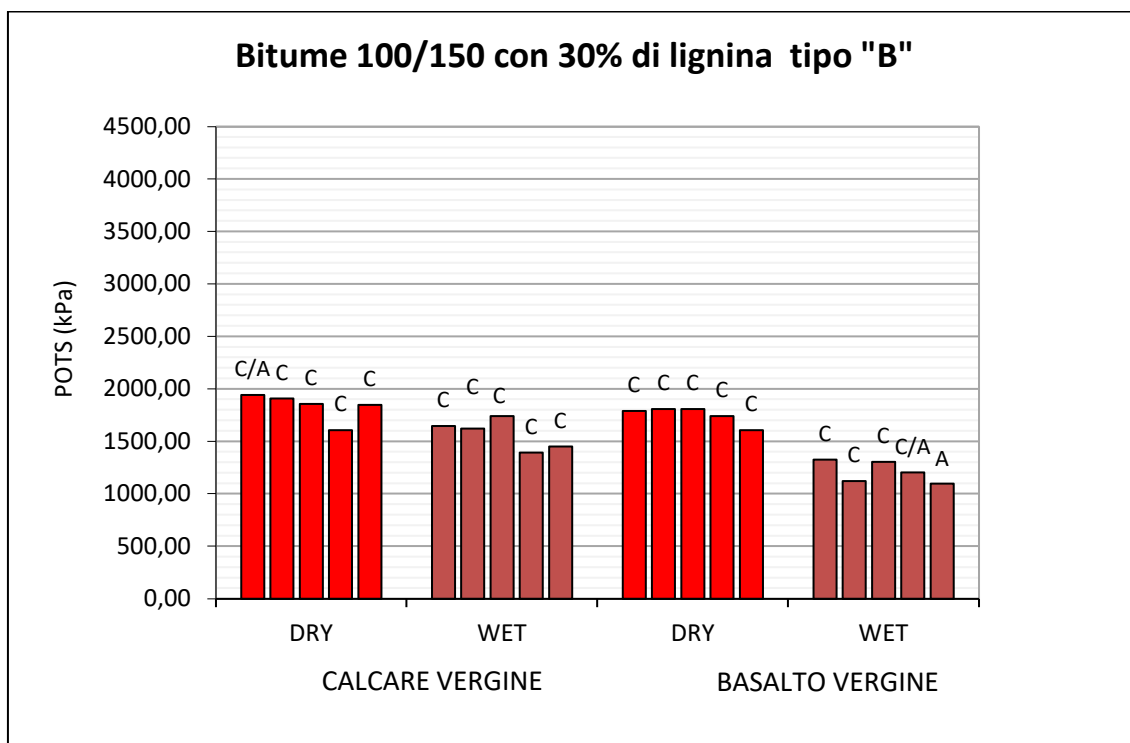


Figura 94 rappresentazione dei risultati ottenuti sugli aggregati vergine con il bitume 100/150 modificato con lignina tipo "B"

Il grafico di figura 94 mostra i risultati delle prove BBS eseguite sul calcare e sul basalto vergini utilizzando come legante il bitume 100/150 modificato con l'aggiunta del 30% di lignina.

Se prendiamo in esame le condizioni "dry" vediamo che sia sul calcare che sul basalto, a fronte di rotture prevalentemente coesive, si registrano valori del POTS molto simili il cui valore medio si attesta intorno ai 1800 kPa.

Nelle condizioni bagnate, pur continuando ad osservare rotture prevalentemente coesive, si registrano valori del POTS mediamente più bassi rispetto alle condizioni asciutte.

A parità di aggregato il condizionamento in acqua, come sempre, produce una riduzione dei valori medi del POTS misurati che risulta più marcata negli aggregati di basalto dove si attesta intorno al 30 %.

➤ *Bitume 100/150 con il 30% di lignina tipo "M"*

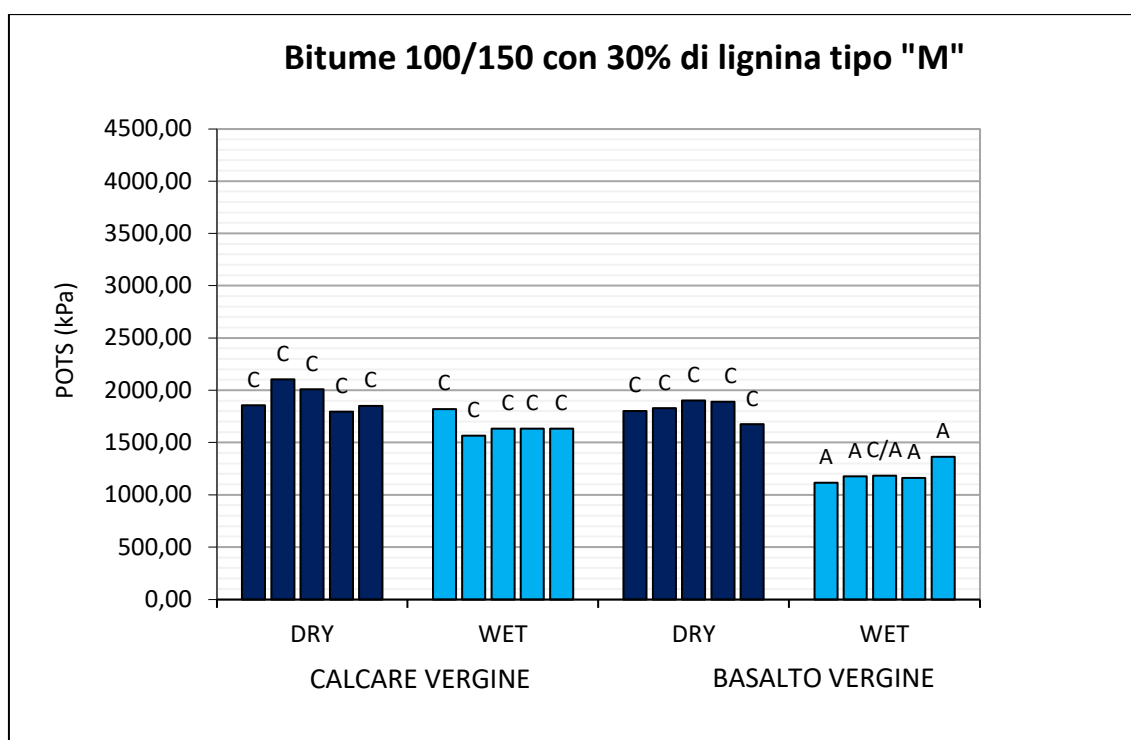


Figura 95 rappresentazione dei risultati ottenuti sugli aggregati vergine con il bitume 100/150 modificato con lignina tipo "M"

Nel grafico di figura 95 sono riportati i risultati delle prove BBS eseguite sul calcare e sul basalto vergini utilizzando come legante il bitume 100/150 modificato con l'aggiunta del 30% di lignina di tipo "M".

Prendendo in esame le condizioni asciutte si vede che, in entrambi i tipi di aggregati, si ottengono tutte rotture di tipo coesivo in cui il valore medio del POTS misurato si aggira intorno a 1850 kPa.

Nelle condizioni bagnate invece le rotture sono di tipo coesivo nei provini di calcare mentre diventano prevalentemente adesive in quelli di basalto con associati valori medi del POTS mediamente inferiori.

A parità di aggregato, passando dalla condizione asciutta a quella bagnate, si osserva una riduzione del POTS del 15% negli aggregati di calcare e del 34% in quelli di basalto. Anche in questo caso, quindi, l'immersione in acqua produce effetti più gravosi sui supporti di basalto.

#### 4.7.3.1 Influenza delle lignine di tipo “B” ed “M” sugli aggregati di calcare

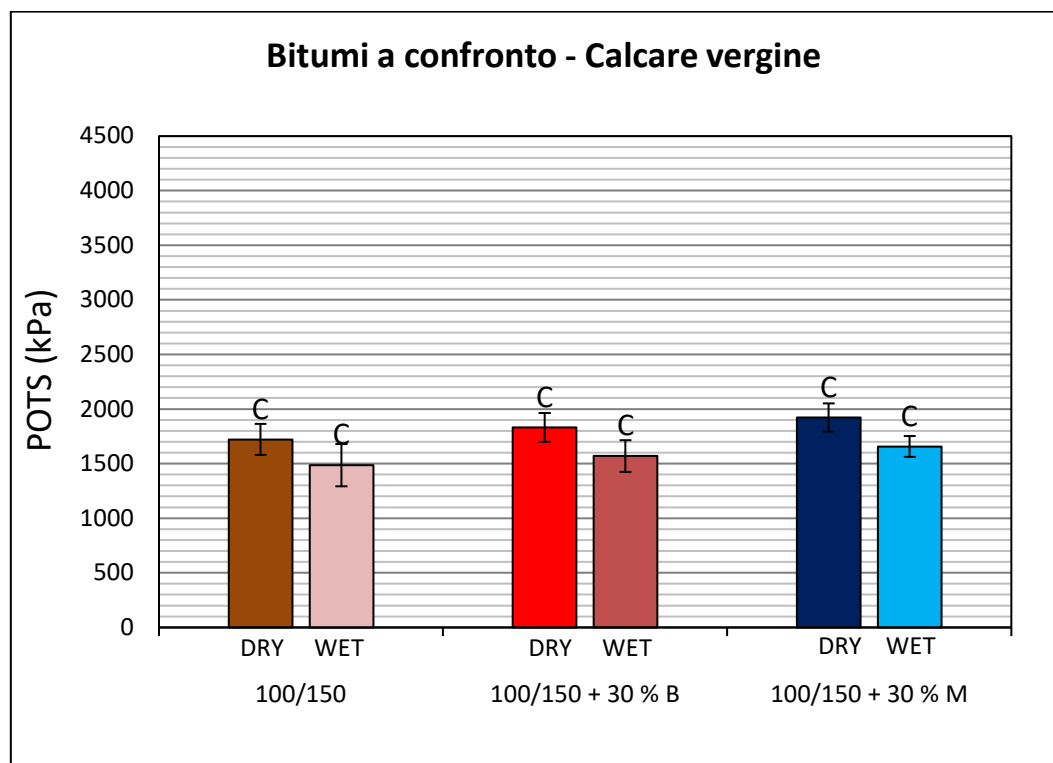


Figura 5 confronto tra bitumi e diversi tipi di lignine su aggregati di calcare vergine

Nella figura 96 sono stati riportati i valori medi del POTS misurati sui provini di calcare confezionati con tre diversi tipi di bitume ovvero: 100/150 ;100/150 + 30% “B” ed infine il 100/150 + 30% “M” nelle due condizioni di prova “dry” e “wet”.

Analizzando le condizioni “dry” si vede che i valori medi del POTS nei due bitumi modificati con l’aggiunta di lignine “B” ed “M” sono sostanzialmente simili se non migliori di quelli raggiunti nel bitume base 100/150 ma inferiori di circa il 20% rispetto a quelli riscontrati nel bitume 50/70.

Le rotture osservate in tutti i casi sono di tipo coesivo e questo evidenzia che su questo tipo di supporto i leganti testati non presentano criticità in termini di adesione.

A parità di tipo di legante impiegato in tutti i casi analizzati l’immersione in acqua ha prodotto una riduzione del valore medio del POTS rispetto alla condizione asciutta. Il decadimento più rilevante è stato registrato nel caso del bitume 50/70 ed è pari al 16%.

Prendendo in esame i due bitumi modificati con lignina possiamo osservare che a parità di condizionamento, il legante modificato con la lignina di tipo “M” sembra mostrare prestazioni leggermente superiori rispetto a quelli esibite bitume modificato con la

lignina di tipo “B” inoltre confrontando questi due bitumi con quello base ovvero il 100/150 da cui sono stati ottenuti, in entrambi i casi, sia in condizioni asciutte che in quelle bagnate le prestazioni in termini di POTS risultano essere confrontabili se non superiori.

In conclusione, possiamo dire che, sui supporti di calcare vergine l’utilizzo di lignina in sostituzione di una parte del legante non sembra indurre particolari criticità al livello di proprietà adesive/coesive.

Concludiamo ora questa parte dell’analisi dei risultanti proponendo le analisi statistiche di tipo Anova.

Calcare			
dry		wet	
tipi di bitume	p-value	tipi di bitume	p-value
100/150 vs 100/150 +30% B	0,2405	100/150 vs 100/150 +30% B	0,4547
100/150 vs 100/150 +30% M	0,0484	100/150 vs 100/150 +30% M	0,1121
100/150 +30 % B vs 100/150 +30% M	0,30764	100/150 +30 % B vs 100/150 +30% M	0,51493

*Tabella 97 influenza del tipo di bitume su aggregati di calcare vergine*

La tabella 97 mostra i risultati ottenuti confrontando i valori del POTS (5 ripetizioni) ricavati con i bitumi 100/150; 100/150 +30% “B”e 100/150 +30% “M” a parità di aggregato (calcare vergine) e di tipologia di condizionamento (“dry” o “wet”).

In tutti i casi analizzati, ad eccezione del confronto tra il bitume 100/150 e il 100/150 +30%”M”in condizioni asciutte il p-value > 0.05. Questo suggerisce che i campioni di dati confrontati non differiscono dal punto di vista statistico e ci conferma quanto affermato sopra ovvero che l’impiego di lignina non penalizza la risposta del sistema nei confronti delle capacità adesive del supporto. Tra l’altro è interessante osservare che nell’ unico caso in cui il test statistico non risulta soddisfatto il p-value è di pochissimo inferiore al valore di soglia assunto pari a 0.05.

#### 4.7.3.2 Influenza delle lignine di tipo “B” ed “M” sugli aggregati di basalto

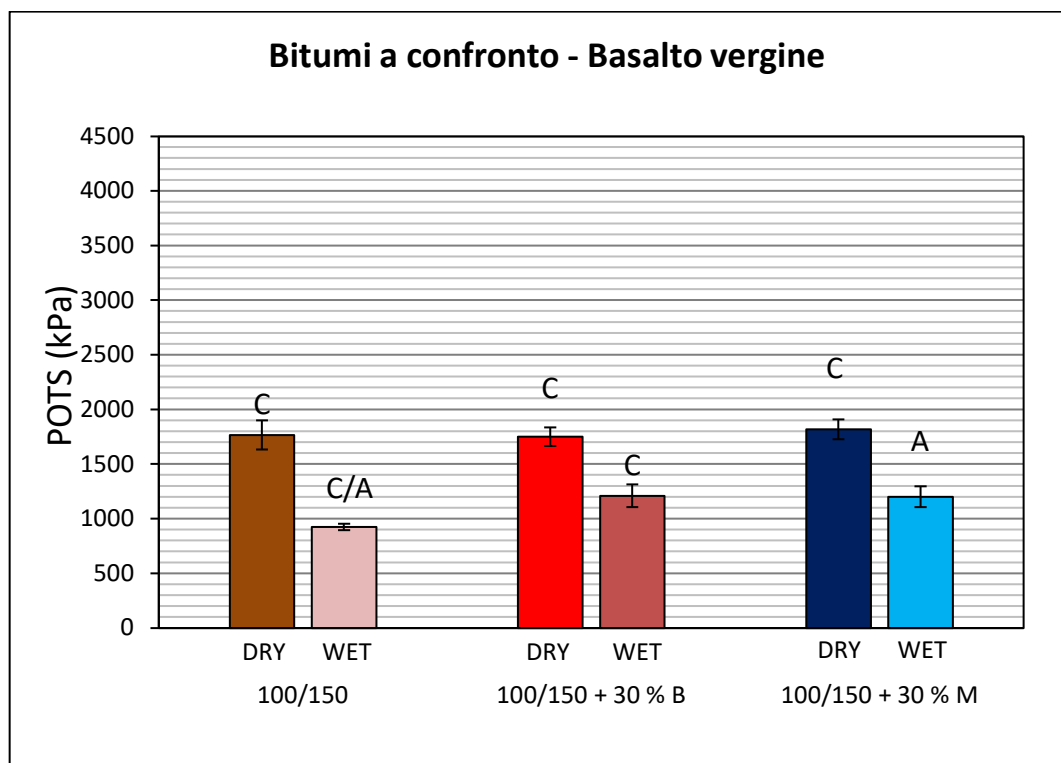


Figura 98 confronto tra bitumi e diversi tipi di lignine su aggregati di basalto vergine

Nella figura 98 sono stati riportati i valori medi del POTS misurati sui provini di basalto confezionati con tre diversi tipi di bitume ovvero: 100/150 ;100/150 + 30% “B” ed infine il 100/150 + 30% “M” nelle due condizioni di prova “dry” e “wet”.

Se prendiamo in esame le condizioni “dry” puro ottenendo tutte rotture coesive i due bitumi modificati con lignina e il bitume 100/150 presentano valori medi del POTS molto simili tra loro

In condizioni “wet” i bitumi 100/150 +30% “B” e 100/150 +30% “M” presentano valori medi del POTS molto simili anche se nel primo caso le rotture all’interfaccia sono di tipo coesivo mentre nel secondo adesive. Rispetto al bitume 100/150, dove sono state osservate rotture ibride all’interfaccia, i due leganti modificati con lignina presentano valori medi del POTS mediamente superiori del 23%

A parità di legante impiegato si vede che:

- Nei bitumi 100/150 +30% “B” e 100/150 +30% “M” l’immersione in acqua produce in entrambi i casi una riduzione del valore medio del POTS che si attesta intorno al 30% tuttavia il legante 100/150 + 30% “M” mostra delle criticità all’interfaccia in quanto le rotture riscontrate sono prevalentemente di tipo adesivo.
- Nel bitume 100/150 il condizionamento in acqua produce un sensibile abbattimento del valore medio del POTS che si attesta intorno al 47%.

In conclusione, possiamo dire che l’impiego di lignina in sostituzione di parte del bitume 100/150 non sembra mostrare particolari problematiche in termini di adesione/coesione. Tra i due tipi di lignina presi in esame quella che sembra avere prestazioni migliori e la tipo “B” perché pur avendo un comportamento simile a quello della lignina “M” nelle prove in acqua non presenta rotture adesive.

Andiamo ora a commentare le verifiche statistiche Anova:

basalto			
dry		wet	
tipi di bitume	p-value	tipi di bitume	p-value
100/1500 vs 100/150+30% B	0,8259	100/1500 vs 100/150+30% B	0,0003
100/150 vs 100/150+30% M	0,4903	100/150 vs 100/150+30% M	0,0003
100/150 +30 % B vs 100/150+30% M	0,5456	100/150 +30 % B vs 100/150+30% M	0,1598

*Tabella 99 influenza del tipo di bitume su aggregati di basalto vergine*

La tabella 99 mostra i risultati ottenuti confrontando i valori del POTS (5 ripetizioni) ricavati con i bitumi 100/150; 100/150 +30% “B” e 100/150 +30% “M” a parità di aggregato (basalto vergine) e di tipologia di condizionamento (“dry” o “wet”).

Da confronto si evince che in condizioni “dry” il p-value > 0.05 in tutti i casi testati segno che i campioni di dati messi a confronto non differiscono dal punto di vista statistico. Questo ci permette di affermare che, in presenza di aggregati basaltici in condizioni asciutte, l’impiego di lignina come sostituto di una porzione del legante 100/150 non costituisce particolari problemi legati all’adesione del materiale.

Se invece andiamo ad analizzare la condizione “wet” vediamo che, solo nel confronto tra i due bitumi modificati con lignina, il P-value > 0.05 e questo ci conferma che i due tipi di lignina impiegati “B” ed “M” non presentano differenze sostanziali in termini di

proprietà adesive/coesive come era lecito aspettarsi alla luce dei risultati misurati dalle prove

Ci proponiamo ora di valutare dal punto di vista statistico l'influenza che il condizionamento in acqua ha avuto sui risultati della prova.

tipo di bitume	p-value	
	calcare	basalto
100/150	0,058536	0,00000077
100/150 + 30% "B"	0,017215	0,00001799
100/150 + 30% "M"	0,006267	0,00000031

*Tabella 100 influenza del tipo di condizionamento (dry e wet) a parità di aggregato (basalto) e di bitume*

La tabella 100 mostra l'influenza del tipo di condizionamento "dry" e "wet" sul legame di adesione ed è stata ottenuta confrontando i valori del POTS dei campioni ottenuti nelle due condizioni asciutto bagnato a parità di tipo di aggregato e di tipo di bitume impiegato.

Negli aggregati calcarei il confronto tra le condizioni "dry" e "wet" presenta delle differenze dal punto di vista statistico ovvero  $p\text{-value} < 0.05$  quanto vengono presi in considerazione i due bitumi modificato con lignina ma non nel caso in cui viene impiegato il bitume 100/150 non modificato.

Negli aggregati di basalto invece otteniamo in tutti casi  $p\text{-value} < 0.05$  a conferma che su questo tipo di supporto l'immersione in acqua contribuisce ad influenzare negativamente le proprietà adesive/coesive del sistema.

#### 4.7.4 Confronto tra i vari tipi di lignine su aggregati di calcare vergine

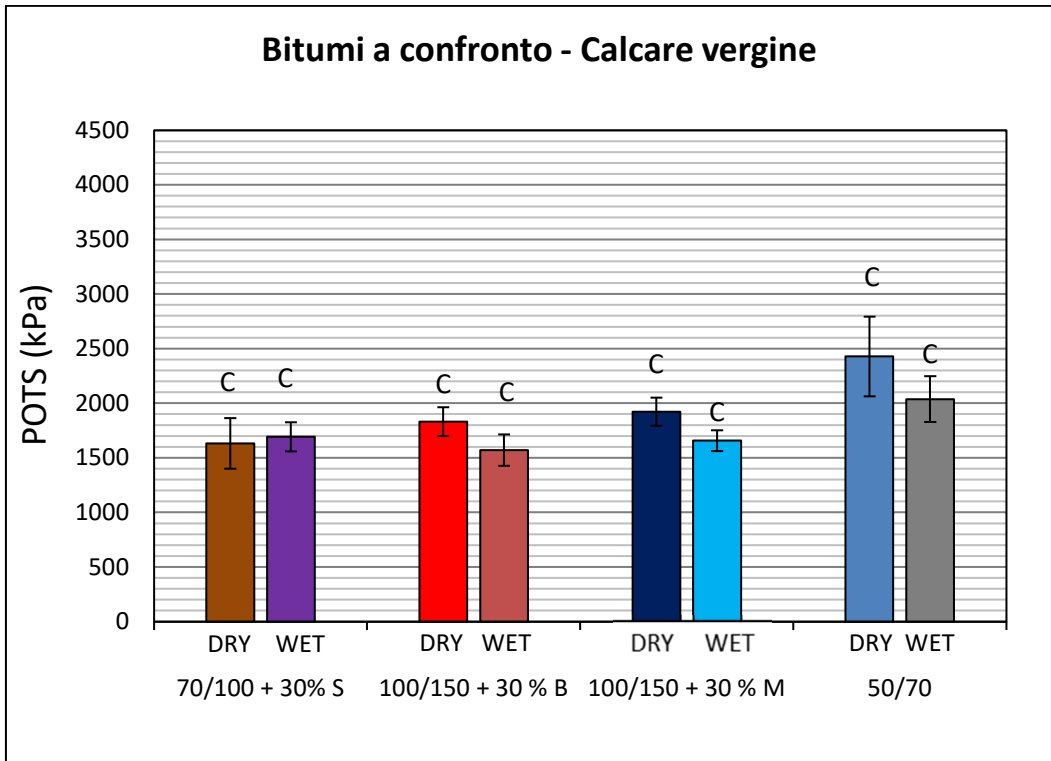


Figura 101 confronto tra i diversi tipi di lignine ed il bitume 50/70

Il grafico di figura 101 riporta i valori medi del POTS misurati sui supporti di calcare vergine nelle due condizioni di prova “dry” e “wet” utilizzando come leganti i bitumi 70/100 +30% S, 100/150 +30% B, 100/150 +30% M e il bitume 50/70 non modificato che presenta caratteristiche, in termini di penetrazione e palla anello confrontabili con quelle dei leganti modificati con lignina.

Se prendiamo in esame le condizioni “dry” possiamo osservare che i tre leganti modificati con lignina raggiungono valori medi del POTS confrontabili tra loro ma inferiori rispetto a quelle esibite dal legante 50/70 pur registrando in tutti i casi rotture di tipo adesivo all’interfaccia.

Anche nelle condizioni “wet” i tre bitumi modificati con la lignina pur avendo rotture di tipo coesivo mostrano valori medi del POTS inferiori di quelli raggiunti dal bitume 50/70.

A parità di tipologia di bitume impiegato, in tutti i casi analizzati, passando dalla condizione “dry” a quella “wet” si osserva a parità di rottura all’interfaccia una diminuzione del valore medio del POTS che nel bitume 50/70, dove è più marcata, è pari al 16%.



In conclusione, possiamo dire che rispetto al bitume 50/70 l'introduzione della lignina in tutti i leganti analizzati tende a penalizzare leggermente la risposta del sistema, in termini di proprietà coesive, sia in condizioni asciutte che in quelle bagnate. Tuttavia, nei leganti modificati con lignina, pur ottenendo valori medi del POTS più bassi, l'influenza del condizionamento in acqua sembra essere meno marcato rispetto al bitume 50/70; addirittura con il legante 70/100 + 305 S si ottengono, nelle prove "wet", valori medi del POTS più alti di quelli registrati nelle prove "dry".

I tre tipi di lignine analizzati non sembrano differire in maniera sostanziale e possono essere considerate equivalenti

Si procede ora con l'analisi statistica di tipo anova su questo gruppo di risultati.

calcare			
dry		wet	
tipi di bitume	p-value	tipi di bitume	p-value
70/100+30% S vs 100/150+30%B	0,0610	70/100+30% S vs 100/150+30%B	0,2000
70/100+30% S vs 100/150+30%M	0,0293	70/100+30% S vs 100/150+30%M	0,6455
100/150+30% B vs 100/150+30%M	0,3076	100/150+30% B vs 100/150+30%M	0,2929

Tabella 102 verifica anova con bitumi modificati con lignina e aggregati di calcare

La tabella 102 è stata ottenuta confrontando i valori del POTS delle singole ripetizioni di ciascuna coppia di bitumi a parità di condizionamento e di aggregato che in questo caso specifico è il calcare.

Come si può osservare in tutti i casi analizzati ad eccezione del confronto tra i bitumi 70/100+30% S e 100/150+30%M il p-value > 0.05 da cui deduciamo che, dal punto di vista statistico, i dati confrontati non differiscono tra loro.

#### 4.7.5 Confronto tra i vari tipi di lignine su aggregati di basalto vergine

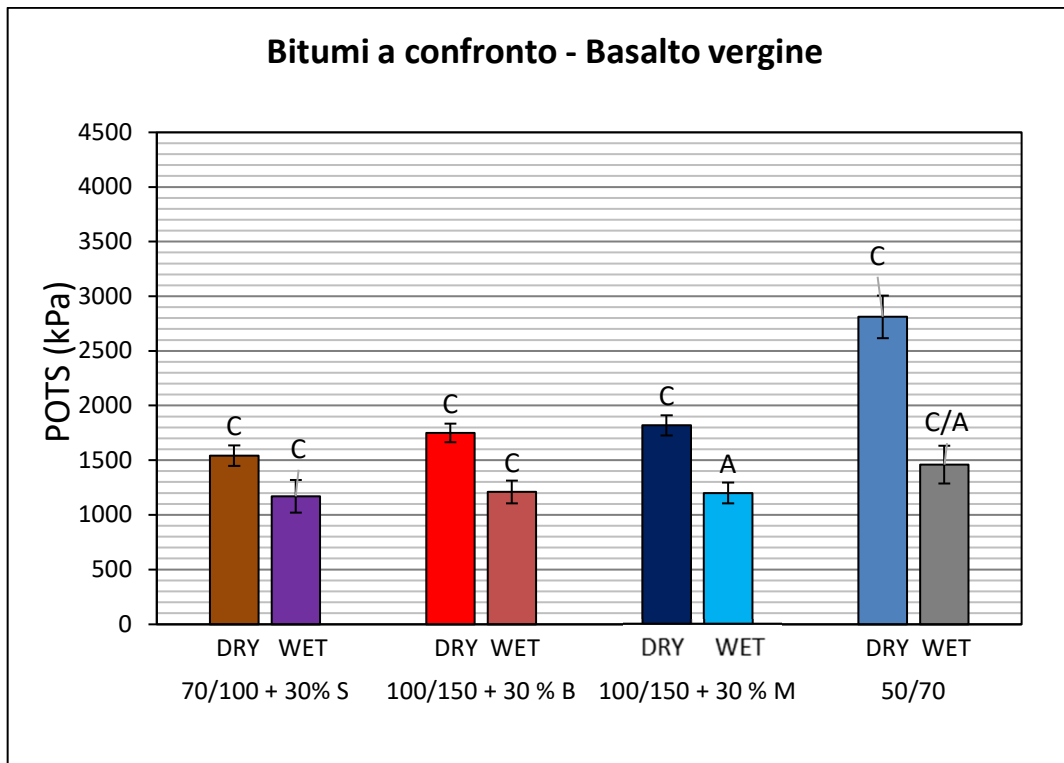


Figura 103 confronto tra i diversi tipi di lignine ed il bitume 50/70

Il grafico di figura 103 riporta i valori medi del POTS misurati sui supporti di basalto vergine nelle due condizioni di prova “dry” e “wet” utilizzando come leganti i bitumi 70/100 +30% S, 100/150 +30% B, 100/150 +30% M e il bitume 50/70 non modificato che presenta caratteristiche, in termini di penetrazione e palla anello confrontabili con quelle dei leganti modificati con lignina.

Con riferimento alle condizioni dry sembra che la lignina di tipo “S” sia quella che fornisce i valori medi del POTS più bassi mentre le lignine “B” ed “M” hanno un comportamento sostanzialmente simile. In tutti e tre i bitumi modificati con le lignine i valori medi del POTS sono inferiori rispetto a quelli esibiti dal bitume 50/70 non modificato pur registrando rotture di tipo coesivo all’interfaccia.

Se premiamo in esame la condizione “wet” si vede che i bitumi in cui è stata aggiunta lignina raggiungono valori medi del POTS molto simili e di poco inferiori a quello del bitume 50/70, tuttavia nel legante 100/150 + 30% M il sistema è andato in crisi per adesione rispetto agli altri casi dove sono prevalse le rotture di tipo coesivo. A parità di tipo di legante impiegato in tutti i casi analizzati il condizionamento in acqua penalizza la risposta del sistema in termini di adesione/coesione, tuttavia,

sembra che l'aggiunta di lignina riduca il divario tra i valori medi del POTS misurati in condizioni asciutte e quelli registrati in condizioni bagnate

In conclusione, possiamo dire che, come osservati sugli aggregati calcarei, l'introduzione di lignina nei leganti testati penalizza in parte la risposta del sistema in termini di adesione coesione che si manifesta con un generale diminuzione dei valori medi del POTS misurati sia in condizioni asciutte che in quelle bagnate.

L'aggiunta di lignina sembra migliorare il comportamento dei sistemi in condizioni "wet" dove le rotture osservate all'interfaccia sono prevalentemente di tipo coesivo.

Segue ora l'analisi statistica di tipo anova su questo gruppo di risultati.

basalto			
dry		wet	
tipi di bitume	p-value	tipi di bitume	p-value
70/100+30% S vs 100/150+30%B	0,0063	70/100+30% S vs 100/150+30%B	0,6333
70/100+30% S vs 100/150+30%M	0,0015	70/100+30% S vs 100/150+30%M	0,7071
100/150+30% B vs 100/150+30%M	0,2538	100/150+30% B vs 100/150+30%M	0,8847

*Tabella 104 verifica anova con bitumi modificati con lignina e aggregati di calcare*

La tabella 104 è stata ottenuta confrontando i valori del POTS delle singole ripetizioni di ciascuna coppia di bitumi a parità di condizionamento e di aggregato che in questo caso specifico è il basalto.

Come si può osservare, in tutti i casi analizzati ad eccezione del confronto tra i bitumi 70/100+30% S e 100/150+30%B; 70/100+30% S e 100/150+30%M il p-value > 0.05 ovvero, dal punto di vista statistico i leganti confrontati non presentano differenze sostanziali.

#### 4.7.6 Bitume SBS Hard modificato con lignina di tipo “S”

➤ *Bitume SBS Hard*

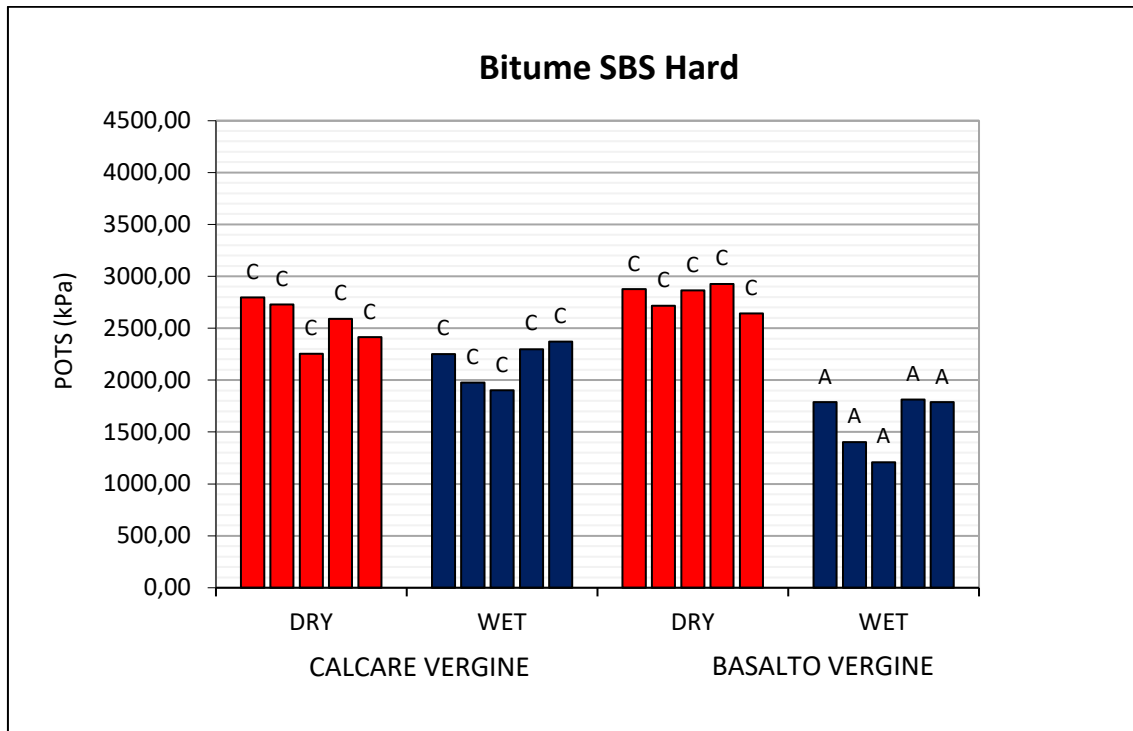


Figura 105 rappresentazione dei risultati ottenuti sugli aggregati vergine con il bitume SBS Hard

Nel grafico di figura 105 sono riportati i risultati delle prove BBS eseguite sul calcare e sul basalto vergini utilizzando come legante il bitume SBS Hard non modificato.

Nelle condizioni di prova “dry” le rotture osservate all’interfaccia sono tutte di tipo coesivo sia sui supporti di calcare che su quelli di basalto; in particolare su questi ultimi si registrano valori del POTS leggermente superiori rispetto a quelli riscontrati sul calcare.

Nelle condizioni di prova “wet” i sistemi confezionati con gli aggregati di calcare non sembrano avere particolari criticità, infatti, le rotture continuano ad essere coesive seppur con valori del POTS leggermente più bassi. Nei provini di basalto invece il condizionamento in acqua manda in crisi il sistema, infatti, all’interfaccia si osservano rotture tutte di tipo adesivo con associati bassi valori del POTS.

➤ *Bitume SBS Hard modificato con l'aggiunta del 10% di lignina tipo "S"*

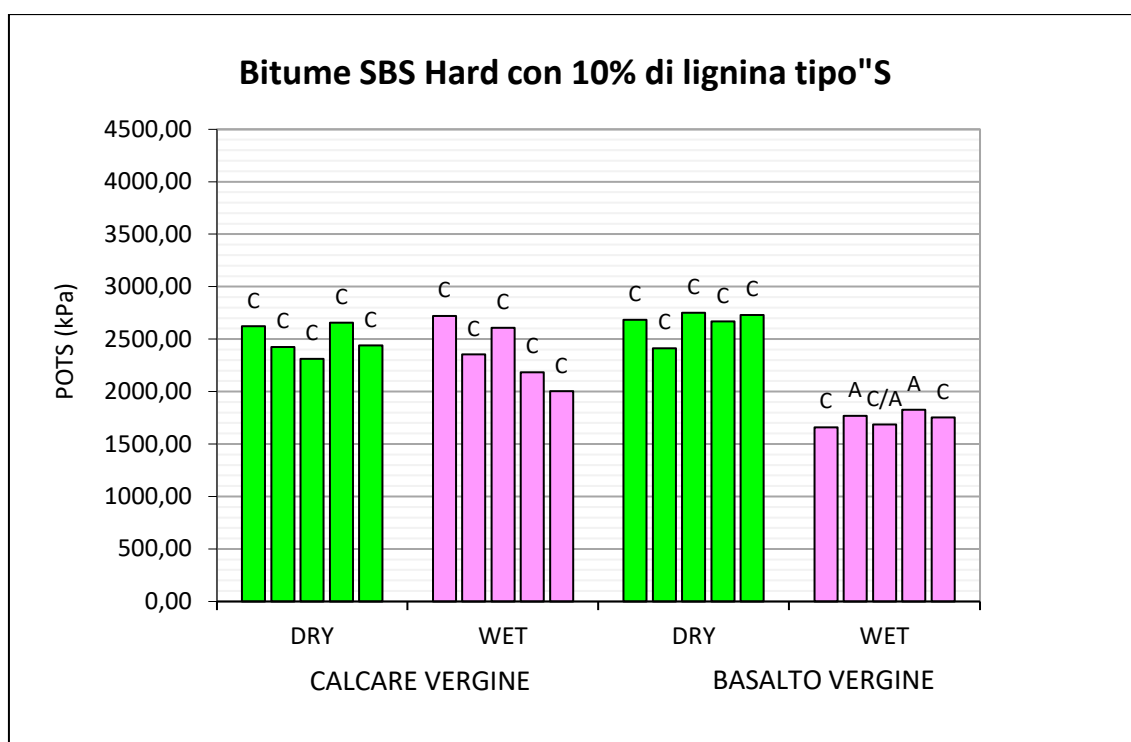


Figura 6 rappresentazione dei risultati ottenuti sugli aggregati vergine con il bitume SBS Hard modificato con lignina tipo "S"

Nel grafico di figura 106 sono riportati i risultati delle prove BBS eseguite sul calcare e sul basalto vergini utilizzando come legante il bitume SBS Hard modificato con la lignina di tipo "S".

È interessante notare che, prendendo in esame le condizioni "dry", i valori del POTS misurati sia sul calcare che sul basalto, sono mediamente superiori a quelli misurati nelle medesime condizioni sugli altri tipi di bitume testati e si aggirano intorno ai 2500 kPa. Le rotture in queste condizioni sono tutte di tipo coesivo.

Se prendiamo in esame le condizioni "wet" possiamo osservare che, sui provini di calcare, le rotture all'interfaccia tendono ad essere tutte coesive mentre quelle sugli aggregati di basalto iniziano a mutare verso quelle adesive. In ogni caso bisogna dire che sulle cinque ripetizioni effettuate solo due hanno evidenziato rotture caratterizzate da distacchi del pistoncino dal supporto, ovvero problemi di adesione, mentre le altre tre, comunque, si sono dimostrate coesive o ibride.

### 1.7.6.1 Influenza della lignina di tipo “S” sugli aggregati di calcare

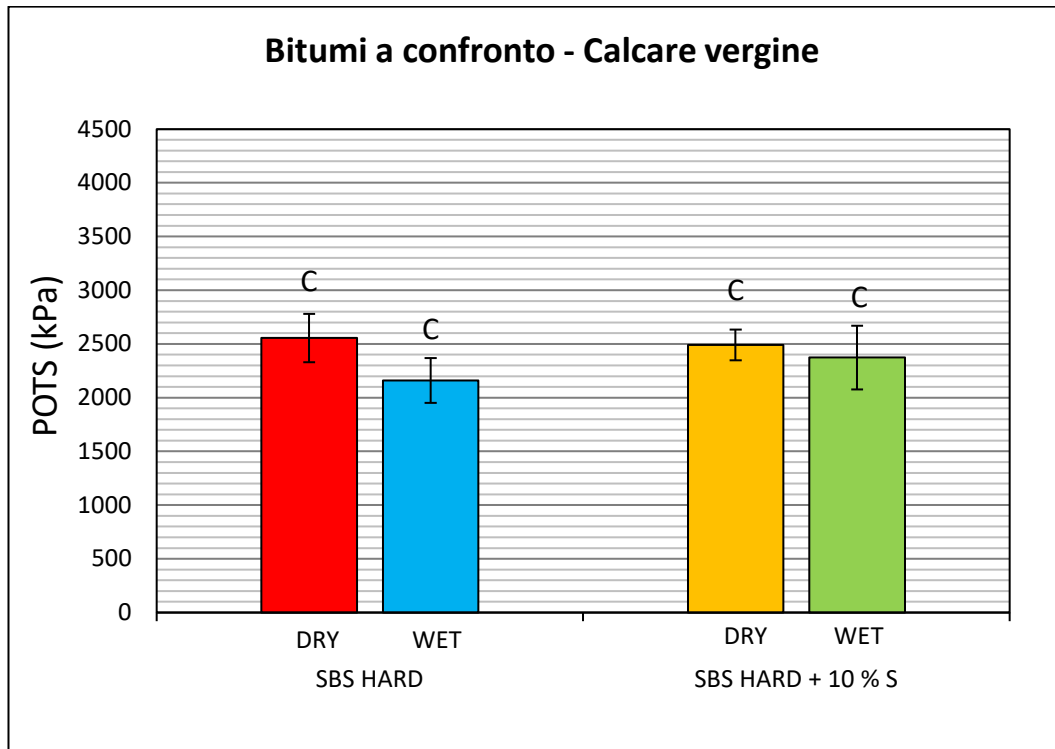


Figura 107 confronto tra bitume SBS Hard e SBS Hard modificato con lignina tipo “S” nelle condizioni “dry” e “wet” su aggregati calcarei

Nella figura 107 sono stati messi a confronto i valori medi del POTS ottenuti nelle due condizioni di prova “dry” e “wet” sui provini di calcare confezionati con il bitume SBS Hard non modificato e su quelli realizzati con lo stesso bitume in cui il 10% del legante è stato sostituito con lignina di tipo “S”.

Con riferimento alle condizioni “dry” i due sistemi presentano praticamente gli stessi valori medi del POTS a fronte di tutte rotture coesive. Questo ci porta a concludere che l’aggiunta di lignina in queste condizioni non penalizza in alcun modo la risposta del sistema in termini di adesione/coesione.

Passando ad analizzare le condizioni “wet” possiamo notare che nei provini in cui è stata utilizzata lignina i valori medi del POTS risultano essere superiori di circa il 9% rispetto a quelli confezionati con il bitume base e quindi in questo caso la lignina sembra addirittura migliorare la risposta del sistema.

A parità di legante impiegato osserviamo che, a fronte di tutte rotture coesive, nei provini confezionati con il bitume SBS Hard l’immersione in acqua produce una

riduzione del valore medio del POTS di circa il 15% che si riduce al 5% in quelli confezionati con il bitume SBS Hard modificato co lignina di tipo S

In conclusione, possiamo affermare che sui supporti di basalto l'aggiunta del 10% di lignina di tipo "S" al bitume SBS Hard non penalizza in alcun modo la risposta del sistema sul fronte delle capacità adesiva/coesiva.

Si riporta ora l'analisi Anova condotta su questo gruppo di risultati

calcare			
dry		wet	
tipi di bitume	p-value	tipi di bitume	p-value
SBS Hard vs SBS Hard +10% S	0.6030	SBS Hard vs SBS Hard +10% S	0.2228

*Tabella 108 influenza del tipo di bitume su aggregati di calcare vergine*

La tabella 108 è stata ottenuta confrontando i valori del POTS delle singole ripetizioni del bitume SBS Hard e di quello modificato con lignina sugli aggregati di calcare vergine a parità di condizionamento "dry" o "wet".

In entrambi i casi non si riscontrano differenze dal punto di vista statistico tra i gruppi di dati confrontati infatti il p-value è sempre maggiore di 0.05 e questo ci conferma che l'introduzione della lignina di tipo S non altera in alcun modo il comportamento del legante nei confronti delle sue proprietà di adesione/coesione.

### 1.7.6.2 Influenza della lignina di tipo “S” sugli aggregati di basalto

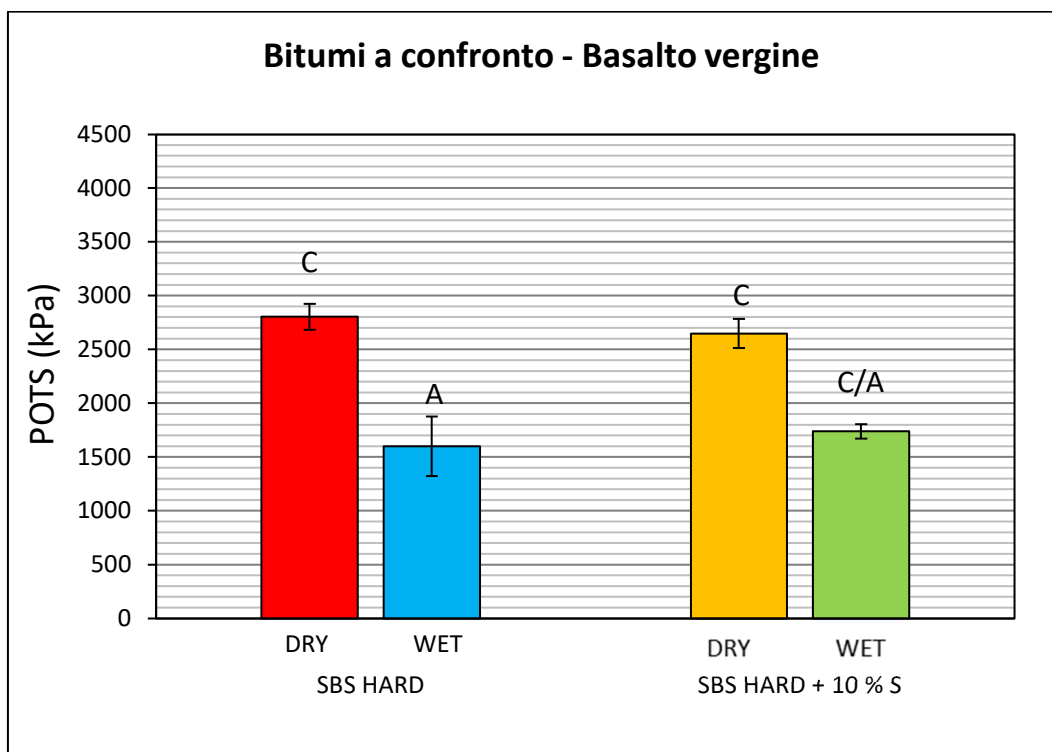


Figura 109 confronto tra bitume SBS Hard e SBS Hard modificato con lignina tipo “S” nelle condizioni “dry” e “wet” su aggregati basaltici

Nella figura 109 sono stati messi a confronto i valori medi del POTS ottenuti nelle due condizioni di prova “dry” e “wet” sui provini di basalto confezionati con il bitume SBS Hard non modificato e su quelli realizzati con lo stesso bitume in cui il 10% del legante è stato sostituito con lignina di tipo “S”.

Prendendo come riferimento la condizione “dry” si vede che le rotture sono tutte di tipo coesivo e nei provini in cui è stato utilizzato il legante SBS Hard + 10%” S” il valore medio del POTS risulta essere di poco inferiore rispetto a quello raggiunto nei provini confezionati con il bitume SBS non modificato.

Nelle condizioni “wet” si vede che l’utilizzo di leganti modificati con lignina migliora le performance del sistema, infatti, le rotture passano da adesive a coesive ed inoltre si assiste ad un generale miglioramento del valore medio del POTS.

A parità di legante utilizzato nei sistemi confezionati con bitume non modificato l’immersione in acqua provoca una crisi del sistema che si esplica con rotture di tipo adesivo all’interfaccia ed un abbattimento del valore medio del POTS di circa il 43%



cosa che invece non accade nei provini realizzati con il bitume modificato con lignina in cui le rotture nelle prove in acqua sono ibride e i valori medi del POTS subiscono una riduzione del 34%.

In ultima analisi possiamo affermare che anche su questo tipo di supporti l'aggiunta del 10% di lignina al bitume SBS Hard non sembra penalizzare la risposta del sistema in termini di adesione e coesione.

Concludiamo ora l'analisi dei risultati proponendo l'analisi statistica ANOVA

basalto			
dry		wet	
tipi di bitume	p-value	tipi di bitume	p-value
SBS Hard vs SBS Hard +10% S	0.0901	SBS Hard vs SBS Hard +10% S	0.3090

*Tabella 110 influenza del tipo di bitume su aggregati di calcare basalto vergine*

La tabella 110 è stata ottenuta confrontando i valori del POTS delle singole ripetizioni del bitume SBS Hard e di quello modificato con lignina sugli aggregati di basalto vergine a parità di condizionamento "dry" o "wet".

Come si può vedere in entrambi i casi analizzati il p-value > 0.05.

Questo ci porta alla conclusione che sugli aggregati di basalto l'introduzione della lignina nel bitume SBS hard in sostituzione del 10% del legante non influenza la risposta del sistema sotto il profilo delle proprietà adesive/coesive.

# CONCLUSIONI

L'obiettivo principale di questa sperimentazione è stato quello di valutare le capacità adesive e coesive di leganti bituminosi innovativi ed ecosostenibili su supporti lapidei comunemente impiegati in campo stradale costituiti da calcare e basalto. Parallelamente, sempre nell'ottica dell'ecosostenibilità nell'ambito delle costruzioni stradali, sono state valutate anche le possibilità di impiego di aggregati di riciclo quali conglomerato bituminoso di recupero, scorie d'altoforno di tipo "elettric arc furnace" e scarti di resine derivanti da processi di lavorazioni industriali.

A tal fine la sperimentazione è stata articolata in tre fasi.

Nella prima fase sono stati analizzati bitumi modificati con compound polimerici ed a base di grafene da plastiche riciclate ottenuti con l'aggiunta del 3% di tali compound ad un bitume base 50/70. Gli aggregati utilizzati in questa fase sono stati calcare e basalto sia vergini che pre-bitumati ovvero ottenuti mediante l'applicazione di un film sottile di bitume sulla superficie al fine di simulare il conglomerato bituminoso di recupero.

Nella seconda fase sono stati analizzati gli aggregati di riciclo costituiti da scorie d'altoforno ottenute dal processo metallurgico mediante utilizzo di forno elettrico ad arco e resine di scarto derivanti da processi di lavorazione industriali utilizzando come legante solo un bitume modificato con polimeri di tipo SBS.

Nella terza fase sono stati analizzati bitumi modificati con lignina in parziale sostituzione del bitume di partenza. In particolare, sono state analizzate tre differenti tipologie di lignina denominate "S", "B" ed "M", caratterizzate da differenti proprietà fisico-chimiche e provenienza, combinate con tre tipi di bitumi base ovvero 70/100, 100/150 e SBS Hard per la produzione di bio-leganti. Nel bitume 70/100 la modifica con la lignina è stata fatta sostituendo il 30% del legante con lignina tipo "S", nel bitume 100/150 sono state impiegate, sempre in sostituzione del 30% del legante, le lignine tipo "B" ed "M" mentre nel legante SBS hard è stata utilizzata la lignina di tipo "S" in sostituzione del 10% del legante. Gli aggregati utilizzati in questa fase sono stati calcare e basalto vergini.

Le proprietà adesive e coesive di tutti i sistemi bitume-aggregato previsti nella sperimentazione sono state valutate tramite l'esecuzione di prove Bitumen Bond Strength (BBS) mediate l'impiego dell'apparecchiatura di prova PATTI e adottando

due tipi di condizionamenti per i sistemi bitume-aggregato prima dell'esecuzione della prova:

“dry” eseguito a 25°C in camera climatica per 24 ore;

“wet” eseguito in acqua a 40°C in bagno termostatico per 24 e successivamente da un condizionamento in aria a 25°C per un'ora in camera climatica.

Alla luce dei risultati delle prove BBS è stato possibile trarre una serie di conclusioni che caratterizzano il comportamento adesivo e coesivo del sistema bitume-aggregato al variare delle condizioni di prova, in particolare:

- Le proprietà di adesione e coesione dei sistemi bitumi modificati con compound polimerici ed aggregati non trattati (aggregati vergini) sono strettamente dipendenti dalla natura degli aggregati in relazione alla tipologia di condizionamento (“dry” o “wet”); nel caso di aggregato calcareo, in entrambe le condizioni di prova "dry" e "wet", l'aggiunta di entrambe le tipologie di compound non sembra influenzare significativamente la risposta adesiva e coesiva del sistema bitume-aggregato. Nel caso di aggregato basaltico, in condizioni di prova "wet", la modifica con i compound polimerici garantisce adeguate e migliorate proprietà di adesione anche in presenza d'acqua rispetto al bitume base. Le prestazioni risultano inoltre comparabili con quelle tipiche di un bitume modificato con SBS.
- Per quanto riguarda i sistemi bitumi modificati con compound polimerici e aggregati pre-bitumati, per tutti e tre i leganti utilizzati e indipendentemente dalla natura degli aggregati, è stata riscontrata una rottura di tipo prevalentemente coesivo con elevati valori della tensione di distacco sia nelle condizioni “dry” che “wet”, evidenziando come la presenza del rivestimento di bitume sulla superficie dell'aggregato (atto a simulare i granuli di fresato), verosimilmente grazie allo sviluppo di reazioni chimiche con il bitume d'aggiunta, sia in grado di migliorare il legame di adesione tra le due componenti riducendo, così, gli effetti negativi dovuti all'azione dell'acqua.
- L'impiego delle scorie d'altoforno elettrico EAF (Electric Arc Furnace) permettono di raggiungere prestazioni, in termini di adesione, confrontabili con quelle mostrate da un aggregato basaltico e addirittura superiori in presenza di acqua. Le migliori caratteristiche di adesione del sistema confezionato con le scorie rispetto all'aggregato basaltico in acqua sono imputabili alla particolare composizione

mineralogica della scoria d'altoforno in quanto caratterizzata da una maggiore alcalinità (in termini di rapporto tra contenuto di ossido di calcio e silice) rispetto al basalto che la rende meno suscettibile all'acqua.

- L'utilizzo delle resine polimeriche derivanti da lavorazioni industriali per la produzione di piani da cucina e lavelli in tutti i casi analizzati, ha evidenziato importanti criticità all'interfaccia bitume-aggregato dove le rotture sono state prevalentemente di tipo adesivo sia in condizioni "dry" che in quelle "wet". Inoltre, è stato riscontrato che tali materiali risultano essere suscettibili alle alte temperature a cui normalmente si esegue la miscelazione tra bitume e aggregati manifestando un significativo rammollimento con associate variazioni di forma. Tale risultato pone dei limiti sul loro utilizzo come aggregati nel confezionamento dei conglomerati bituminosi a caldo. Si suggerisce comunque di valutare un loro possibile impiego nei conglomerati bituminosi a freddo o come inerte negli strati non legati.
- In generale, l'utilizzo delle lignine quale parziale sostituzione del legante (30%) non sembra penalizzare la risposta del sistema bitume-aggregato in termini sia di proprietà adesive che coesive. I bitumi confezionati con le tre differenti lignine, infatti, hanno mostrato valori medi del POTS confrontabili ed in alcuni casi migliori rispetto a quelli dei rispettivi bitumi base. Inoltre, nelle prove "wet" eseguite su sistemi con aggregato basaltico per i quali normalmente si raggiunge la crisi all'interfaccia per perdita di adesione a causa della migliore affinità dell'aggregato con l'acqua, si è riscontrato per tutti i bitumi additivati con lignina, un lieve miglioramento delle proprietà adesive valutato sulla base di rotture che sono risultate prevalentemente di tipo ibrido o coesivo, e comunque in funzione del tipo di lignina considerata.

In conclusione, possiamo dire che, ad eccezione delle resine polimeriche derivanti da processi industriali per la produzione di accessori per cucina, tutti i sistemi bitume-aggregato testati ed ottenuti con materiali di tipo innovativo (bitumi modificati con compound polimerici da plastiche di scarto, aggregati riciclati e bio-leganti) hanno presentano buone proprietà adesive e coesive decisamente comparabili con quelle dei tradizionali sistemi bitume-aggregato vergine evidenziando significativi margini di impiego, nell'ottica della sostenibilità ambientale, nella formulazione di miscele di conglomerato bituminoso per pavimentazioni stradali.

Chiaramente l'analisi delle proprietà di adesione e coesione presa in esame in questo studio è solo uno dei tanti aspetti prestazionali da considerare per valutare l'effettiva potenzialità d'impiego di tali materiali innovativi.

Si rimanda pertanto ad ulteriori studi specialistici atti ad approfondire in maniera più esaustiva il comportamento meccanico delle miscele realizzate con questi materiali innovativi per capire le loro reali possibilità di impiego in ambito stradale.

# BIBLIOGRAFIA

- [1] - Ferrari Giannini F., “Ingegneria Stradale”, Vol. 2, Il Corpo Stradale e Pavimentazioni, ISEDI, Milano 1980.
- [2] - Tesoriere G., “Strade Ferrovie e Aeroporti”, Vol. 2, Opere in Terra e Sovrastrutture, UTET, 1994.
- [3] - Santagata E., “Bitumi e Conglomerati Bituminosi”, Materiali per l’Ingegneria
- [4] - Shenghua Wu Luke Montalvo *Repurposing waste plastics into cleaner asphalt pavement materials: A critical literature review*, Journal of Cleaner Production 280, settembre 2020.
- [5] - Gideon O. Bamigboye, Daniel E. Bassey David O. Olukanni a, Ben U. Ngene a, Dunmininu Adegoke a, Abimbola O. Odetoyan a, Mutiu A. Kareem b, David O. Enabulele a, Austin T. Nworgu, *Waste materials in highway applications: An overview on generation and utilization implications on sustainability*, Journal of Cleaner Production, Agosto 2020.
- [6] - Wei Hu, Xiang Shu, Baoshan Huang *Sustainability innovations in transportation infrastructure: An overview of the special volume on sustainable road pavin*, Journal of Cleaner Production Giugno 2019.
- [7] - Jun Xie , Zongwu Chen, Ling Pang, Shaopeng Wu *Implementation of modified pull-off test by UTM to investigate bonding characteristics of bitumen and basic oxygen furnace sla*, Construction and Building Materials 57, febbraio 2014.
- [8] - Marco Pasetto , Nicola Baldo, *Performance comparative analysis of stone mastic asphalts with electric arc furnace steel slag: a laboratory evaluation*, , Materials and Structures, Settembre 2011.
- [9] - Amir Mehrara, Ali Khodaii, *A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete*, Construction and Building Materials , settembre 2012.
- [10] - Lorenzo Paolo Ingrassia . Fabrizio Cardone . Francesco Canestrari . Xiaohu Lu *Experimental investigation on the bond strength between sustainable road bio-binders and aggregate substrate*, Materials and Structures , giugno 2019.

- [11] - Fabrizio Cardone, Amedeo Virgili, Andrea Graziani *Evaluation of bonding between reclaimed asphalt aggregate and bitumen emulsion composites*; Construction and Building Materials giugno 2018.
- [12] - Francesco Canestrari, Gilda Ferrotti, Fabrizio Cardone, Arianna Stimilli *Innovative testing protocol for evaluation of Binder reclaimed aggregate bond strength*, transportation research record n.2444, 2014.
- [13] - ERGIO PORISIENSI Dipartimento Ricerca Sviluppo ed Ambiente, Ferriere Nord Spa MAURO MASCHIETTO, PAOLO GRANDESSO C.R.S. Centro Ricerche Stradali Spa. *Scorie di acciaieria: un nuovo aggregato ad elevate caratteristiche per conglomerati bituminosi speciali*.
- [14] - Ignacio Pére, Ana R. Pasandín , Jorge C. Pais; Paulo A. A. Pereira *Feasibility of Using a Lignin-Containing Waste in Asphalt Binders*, Waste and Biomass Valorization Gennaio 2019.
- [15] - Junfeng Gao a,b , Hainian Wang a , Chaochao Liu c , Dongdong Ge b , Zhanping You b, Miao Yu, *High-temperature rheological behavior and fatigue performance of lignin modified asphalt binder*, Construction and Building Materials, settembre 2019.
- [16] - Shangxian Xie, Qiang Li, Pravat Karki,|| Fujie Zhou, and Joshua S. Yuan, *Lignin as Renewable and Superior Asphalt Binder Modifier*, ACS Sustainable Chemistry & Engineering.
- [17] -Shams Arafat a , Narendra Kumar b , Nazimuddin M. Wasiuddin a , Ekugbere O. Owhe b , Joan G. Lynam, *Sustainable lignin to enhance asphalt binder oxidative aging properties and mix properties* , Journal of Cleaner Production, gennaio 2019.