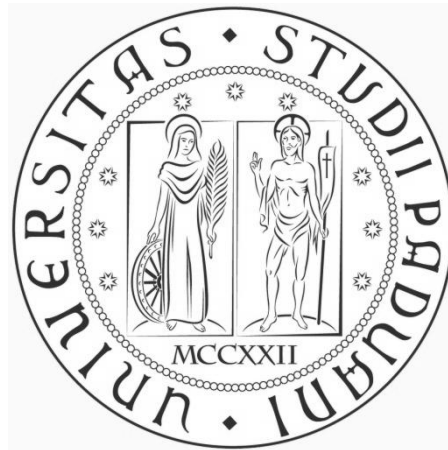


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale



Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI
WARM MIX ASPHALT CONTENENTI
SCORIE DI ACCIAIERIA**

RELATORE: Ch.mo Prof. Ing. MARCO PASETTO

CORRELATORI: Ing. GIOVANNI GIACOMELLO

Ing. EMILIANO PASQUINI

LAUREANDO: ALESSANDRO PANTANO

anno accademico 2014-2015

*Dedicato
ai miei cari*

Sommario

PARTE I: PRESUPPOSTI TEORICI e NORMATIVE

1. INTRODUZIONE	13
1.1. OBIETTIVI	14
2. WMA – WARM MIX ASPHALT.....	15
2.1. VANTAGGI SULL'UTILIZZO DEI WMA	16
2.1.1. RIDUZIONE EMISSIONI.....	16
2.1.2. RIDUZIONE CONSUMO CARBURANTE	16
2.1.3. BENEFICI DURANTE IL TRASPORTO E LA POSA	17
2.1.4. RIDUZIONE ESPOSIZIONE LAVORATORI.....	18
2.2. CLASSIFICAZIONE WMA.....	18
2.2.1. CLASSIFICAZIONE PER RANGE DI TEMPERATURA.....	19
2.2.2. CLASSIFICAZIONE IN BASE AL PROCESSO DI PRODUZIONE	19
2.3. PRODOTTI WMA	20
2.3.1. ADDITIVI ORGANICI	20
2.3.2. PROCESSI DI SCHIUMATURA.....	22
2.3.3. TECNOLOGIE EMERGENTI negli STATI UNITI.....	25
3. MATERIALI PER INFRASTRUTTURE STRADALI	27
3.1. LE TERRE	27
3.2. I MATERIALI IN AMBITO STRADALE	28
3.2.1. MATERIALI TRADIZIONALI: GLI AGGREGATI LAPIDEI	29
3.2.2. I MATERIALI TRADIZIONALI: FILLER	29
3.2.3. MATERIALI ALTERNATIVI	30
3.3. LE SCORIE EAF	32
3.3.1. PRODUZIONE ACCIAIO	33
3.3.2. FORNO ELETTRICO EAF	34
3.3.3. QUADRO NORMATIVO SUI PRODOTTI DI RIFIUTO	35
3.4. CLASSIFICAZIONE E CURVE GRANULOMETRICHE	37
3.5. PROPRIETÀ FISICHE/MECCANICHE	39

3.6.	REQUISITI DI ACCETTAZIONE IN LABORATORIO.....	39
3.7.	NORME PER LO STUDIO DEGLI AGGREGATI.....	40
3.7.1.	NORMA CNR 23.....	41
3.7.2.	NORMA CNR 27.....	44
3.7.3.	NORMA CNR 62.....	48
3.7.4.	NORMA CNR 63.....	49
3.7.5.	NORMA CNR 64.....	54
3.7.6.	NORMA CNR 95.....	56
3.7.7.	UNI EN 1097-2.....	60
3.7.8.	NORMA CNR-UNI 10014.....	65
3.8.	I LEGANTI.....	67
3.8.1.	BITUMI MODIFICATI/ADDITIVATI/POLIMERICI.....	69
3.8.2.	PREGI E DIFETTI DEL BITUME.....	69
3.8.3.	CONGLOMERATO BITUMINOSO.....	70
4.	CARATTERIZZAZIONE STATICA E DINAMICA DEI CONGLOMERATI.....	73
4.1.	CARATTERIZZAZIONE STATICA DELLE MISCELE BITUMINOSE.....	73
4.1.1.	MODULO RIGIDEZZA DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI E BITUMI.....	74
4.2.	CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DELLE MISCELE BITUMINOSE.....	75
4.3.	MODULI DI RIGIDEZZA - ANNESSI.....	78
4.3.1.	PROVA A TRAZIONE INDIRETTA.....	79
4.3.2.	UNI EN 12697-26 - ANNESSO C - PROVA ITSM.....	80
4.3.3.	MODULO RESILIENTE.....	82
4.4.	FATICA.....	83
4.4.1.	I MECCANISMI DI ROTTURA.....	84
4.4.2.	PROVA A FATICA.....	85
4.4.3.	INFLUENZA DELLA TEMPERATURA SULLA FATICA.....	88
4.4.4.	INFLUENZA DEL TIPO DI BITUME.....	88
4.4.5.	INFLUENZA DELLA QUANTITÀ DI BITUME.....	89
4.4.6.	INFLUENZA DEL CONTENUTO DEI VUOTI e AGGREGATI.....	89
4.4.7.	LIMITI TEST DI FATICA IN LABORATORIO.....	89
4.5.	DEFORMAZIONI PERMANENTI : ORMAIAMENTO.....	90
4.5.1.	FASI DI ACCUMULO DI DEFORMAZIONI PERMANENTI.....	90
4.5.2.	TIPOLOGIE DI COLLASSO.....	91

4.5.3.	INFLUENZA DEL BITUME	92
4.5.4.	INFLUENZA DEGLI AGGREGATI	93
4.5.5.	ESECUZIONE PROVA CREEP STATICO	93
4.5.6.	ESECUZIONE PROVA CREEP DINAMICO.....	98

PARTE II: SEZIONE SPERIMENTALE

5.	PROGRAMMA SPERIMENTALE	103
5.1.	MISCELE	103
5.2.	TEMPERATURA DI PRODUZIONE	103
5.3.	CONFEZIONAMENTO PROVINI	104
5.4.	CARATTERIZZAZIONE PRESTAZIONALE.....	104
5.5.	NOMENCLATURA PROVINI	105
6.	CARATTERIZZAZIONE DEGLI AGGREGATI.....	107
6.1.	CURVE GRANULOMETRICHE.....	107
6.2.	CONFRONTO CARATTERISTICHE PIETRISCO E SCORIE.....	116
6.2.1.	RISULTATI EQUIVALENTE IN SABBIA.....	116
6.2.2.	RISULTATI MASSA VOLUMICA APPARENTE DI AGGREGATI NON ADDENSATI	118
6.2.3.	RISULTATI MASSA VOLUMICA APPARENTE DEI GRANULI DI UN AGGREGATO	120
6.2.4.	RISULTATI DELLA MASSA VOLUMICA REALE DEI GRANULI DI UN AGGREGATO	122
6.2.5.	RISULTATI FORMA E APPIATTIMENTO DI AGGREGATI LAPIDEI.....	123
6.2.6.	RISULTATI DELLA DELLA RESISTENZA ALLA FRAMMENTAZIONE	127
6.2.7.	RISULTATI DEI LIMITI DI CONSISTENZA (O DI ATTERBERG) DI UNA TERRA	128
8.	MIX DESIGN.....	129
7.1.	CAPITOLATO AUTOSTRADE DI RIFERIMENTO.....	129
7.2.	MIX DESIGN WMA CON CALCARE	130
7.3.	MIX DESIGN WMA CON SCORIE	131
7.4.	PRODUZIONE DEI PROVINI	133
7.4.1.	QUANTITATIVO MATERIALE PER PROVINI CONTENENTI CALCARE	133
7.4.2.	QUANTITATIVO MATERIALE PER PROVINI CONTENENTI SCORIE	134
7.4.3.	PROCEDURA PRODUZIONE PROVINI	134

8. COMPATTABILITÀ	137
8.1. PRESSA GIRATORIA	137
8.2. SUDDIVISIONE PROVINI	138
8.3. PROCEDURA TRATTAZIONE RISULTATI PRESSA GIRATORIA.....	138
9. INDICE DEI VUOTI	143
9.1. NORMATIVA UNIEN 12697-5.....	143
9.2. NORMATIVA UNIEN 12697-6.....	145
9.3. NORMATIVA UNIEN 12697-8.....	147
9.4. PROCEDURA PER LA DETERMINAZIONE DEI VUOTI	148
10. RIGIDEZZA	149
10.1. NORMA BS DD 213	149
10.2. PRESSA DINAMICA COOPER RESERCH TECHNOLOGY	154
10.3. PROCEDURA IN LABORATORIO PROVA ITST.....	155
11. DEFORMAZIONI PERMANENTI	159
11.1. NORMATIVA UNIEN 12697-25.....	159
11.2. PROCEDURA IN LABORATORIO PROVA CREEP DINAMICO.....	163
12. FATICA	167
12.1. NORMA BS DD ABF	167
12.2. PROCEDURA IN LABORATORIO PROVA ITFT.....	175

PARTE III: RISULTATI e ANALISI DEI DATI

13. RISULTATI INDICE DEI VUOTI	179
13.1. DENSITÀ MASSIMA	179
13.2. BULK DENSITY	180
13.3. INDICE DEI VUOTI	181
14. RISULTATI PRESSA GIRATORIA	183

14.1.	GRADO COMPATTAZIONE WL110	183
14.2.	GRADO COMPATTAZIONE WS110	187
14.3.	COMPARAZIONE DEL GRADO DI COMPATTAZIONE	191
14.4.	INDICE CEI	192
14.4.1.	CALCOLO INDICE CEI	193
15.	RISULTATI DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TRAZIONE INDIRETTA	197
15.1.	MODULI RIGIDEZZA WL110	197
15.2.	MODULI RIGIDEZZA WS110	198
15.3.	CONFRONTO TRA MODULI DI RIGIDEZZA E COMMENTI	199
16.	RISULTATI DELLE DEFORMAZIONI PERMANENTI.....	201
16.1.	DEFORMAZIONI PERMANENTI WL110	202
16.2.	DEFORMAZIONI PERMANENTI WS110	206
16.3.	CONFRONTO DEFORMAZIONI PERMANENTI E COMMENTI.....	210
17.	RISULTATI DELLA PROVA A FATICA	213
17.1.	RISULTATI PROVA FATICA WL110.....	214
17.2.	RISULTATI PROVA FATICA WS110.....	215
17.3.	CONFRONTO TRA RESISTENZE A FATICA E COMMENTI	216
18.	CONCLUSIONI	219
19.	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	221

Parte I:

PRESUPPOSTI TEORICI e

NORMATIVE

1.INTRODUZIONE

A causa della crescente consapevolezza riguardo l'ambiente e la sostenibilità, l'impatto e l'applicazione di questi temi stanno diventando negli ultimi anni fattori molto importanti per ogni industria. E' risaputo che la Terra non dispone di risorse illimitate, anzi, come nel caso dei combustibili fossili che sono le fonti energetiche più utilizzate e indispensabili. Purtroppo si è realizzato che il loro esaurimento possa non essere lontano nel tempo. Per tali motivi, da tempo vengono sfruttate e sperimentate fonti energetiche alternative, meno costose se usate in larga scala e soprattutto meno inquinanti. Le direttive della CE stanno costringendo le industrie a limitare l'uso delle risorse naturali e aumentare il riutilizzo dei materiali. Come risultato delle recenti sfide globali, anche l'industria dell'asfalto si sta prendendo cura della sua quota per quanto riguarda questi sviluppi. L'industria dell'asfalto, come altri settori, dovrebbe essere responsabile per la sostenibilità di fronte alle generazioni future, come dice il seguente detto: "la sostenibilità è lo sviluppo che soddisfa i bisogni della generazione presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni."

Per essere efficace, la Commissione Europea intende focalizzarsi su 2 punti chiave:

- cambiamento climatico ed economia a basso carbonio;
- uso sostenibile ed efficiente delle risorse naturali, dell'energia e dei materiali.

I loro obiettivi sono migliorare la disponibilità dei prodotti sul mercato e il modo in cui vengono consumati. Per quanto riguarda il contributo dell'industria dell'asfalto alla sostenibilità, i temi e le politiche a livello comunitario che influenzano il settore dei trasporti su strada sono:

- consumo di energia;
- uso dei materiali;
- minimizzazione degli sprechi;
- ambiente e salute;
- sicurezza;
- natura e paesaggio.

1.1. OBIETTIVI

Quello su cui è incentrata questa tesi sono sui problemi ambientali, sulla sicurezza e sulla salute degli operatori (incaricati a produrre e posare i conglomerati bituminosi). Ecco che tutto ciò ha sempre suscitato lunghi dibattiti sulla dannosità dei fumi originati dal riscaldamento dei conglomerati alle temperature di 160-180°C richieste per la loro compattazione.

Ecco che il tema di questo elaborato si è focalizzato nello studio di miscele additivate a livello chimico in modo tale da ottenere conglomerati tiepidi a bassa temperatura di produzione, i cosiddetti warm mix asphalt. I loro vantaggi a carattere ambientale verranno elencati nei prossimi capitoli. Oltretutto il principale fattore a beneficio dell'ambiente è stato l'adozione di scorie come materiale sostitutivo del calcare.

L'analisi quindi si è incentrata sulla comparazione del comportamento meccanico di due miscele additivate con un prodotto chimico la cui differenza si trova nello schema litico:

- una miscela costituita dal 100% di calcare;
- una miscela costituita dal 40% di scorie e 100%di calcare.

2.WMA – WARM MIX ASPHALT

L'esigenza di abbattere le emissioni in atmosfera (CO₂, NO_x, COV, polveri sottili ecc) e le non illimitate disponibilità di combustibili fossili, impongono anche al settore dei conglomerati bituminosi di indirizzarsi verso sistemi di produzione ecosostenibili. L'industria dell'asfalto e le sue agenzie partner sono costantemente alla ricerca di diversi modi per migliorare le prestazioni, aumentare l'efficienza di costruzione, la conservazione delle risorse e gestione ambientale. Notevoli sono infatti i benefici economici e applicativi legati a queste tecnologie.

Una di queste tecnologie, ora in fase di valutazione, sono i WMA, "warm mix asphalt" più comunemente chiamati asfalti tiepidi.

I WMA rappresentano un gruppo di tecnologie che consentono una riduzione delle temperature durante la produzione e la compattazione dei conglomerati a differenza dei più comuni modi di produrre il conglomerato bituminoso. Quest'ultimi verranno chiamati nel corso della tesi HMA ovvero "Hot Mix Asphalt". Lo sviluppo sostenibile quindi non si concentra solamente sull'ambiente ma comprende anche tre settori interdipendenti (Figura 2.1):

- sviluppo economico
- sviluppo sociale
- tutela ambientale

Il WMA è coerente con gli ideali descritti dallo sviluppo sostenibile.

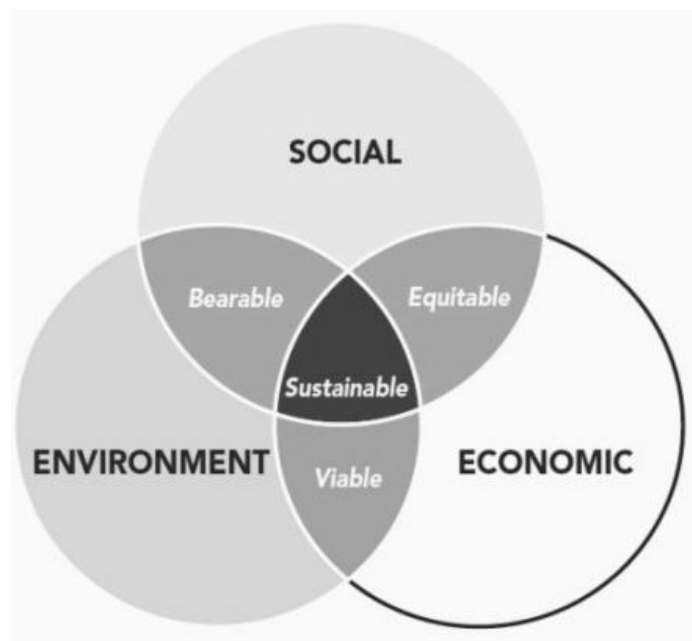


Figura 2.1 Tre settori interdipendenti della sostenibilità

2.1. VANTAGGI SULL'UTILIZZO DEI WMA

I vantaggi sull'utilizzo degli WMA sono molteplici e, prima dei dettagli, si possono riassumere in:

- riduzione emissioni;
- riduzione consumo carburante;
- benefici durante il trasporto e posa;
- riduzione esposizione lavoratori.

2.1.1. RIDUZIONE EMISSIONI

Con l'utilizzo degli WMA le emissioni degli impianti sono significativamente ridotte. Riduzioni tipiche previste sono del 30-40% per le emissioni di CO₂ e di anidride solforosa SO₂, 50% per i composti organici volatili VOC, 10-30% per il monossido di carbonio CO, 60-70% per gli ossidi di azoto NO_x e 20-25% per le polveri sottili. Riduzioni effettive variano in base a una serie di fattori ma comunque fosse i risultati si traducono in maggiori riduzioni della temperatura e quindi maggiori riduzioni delle emissioni.

Nella seguente tabella vengono riportate le diverse gamme di riduzioni di emissioni in alcuni Paesi europei.

EMISSIONI	NORVEGIA	ITALIA	PAESI BASSI	FRANCIA
CO ₂	31.5%	30-40%	15-30%	23%
SO ₂	NA	35%	NA	18%
VOC	NA	50%	NA	19%
CO	28.5%	10-30%	NA	NA
NO _x	61.5%	60-70%	NA	18%

Tabella 2.1 Percentuali riduzione emissioni

2.1.2. RIDUZIONE CONSUMO CARBURANTE

Il risparmio del carburante del bruciatore con l'utilizzo della tecnologia WMA è abbastanza significativo nei giorni odierni dato che i prezzi sono notevolmente aumentati negli ultimi anni.

E' stimato che se le temperature di produzione dovessero essere ridotte di 28°C (50°F), il consumo di carburante per scaldare ed essiccare l'aggregato sarà ridotto del 11%. Calcoli teorici hanno dimostrato che per un WMA, le cui temperature per il mixaggio si aggirerebbero attorno 100°C (212°F), inducono una riduzione percentuale del 50% del consumo del carburante. Questo potrebbe essere garantito se si dovessero utilizzare processi a basso dispendio energetico in cui aggregati, o un porzione di aggregati, non vengono riscaldati al di sopra della punto di ebollizione dell'acqua. Ben o male quindi il risparmio di carburante rispetto agli HMA può variare attorno all'11-35%.

2.1.3. BENEFICI DURANTE IL TRASPORTO E LA POSA

I benefici sulle pavimentazioni includono la possibilità di stendere a temperature ambientali più basse di quelle consuete per gli HMA. Questo fa sì che le miscele possono anche essere trasportate per lunghe distanze prima della posa. La ridotta differenza tra la temperatura ambientale e quella della miscela induce a un tasso di raffreddamento più lento. Tutto ciò è quindi traducibile in un maggior tempo a disposizione per la compattazione.

Di seguito vengono riportati vari esempi di posa e trasporto:

-L'azienda norvegese Kolo Veidekke dichiara di avere conservato il proprio additivo per 48 ore e, una volta estratto, era ancora possibile stendere il mix e compattarlo grazie alla capacità del bitume tiepido di mantenere la densità, la lavorabilità e la capacità di compattazione anche a temperature più fredde. Sempre la stessa azienda consiglia che occorre in genere 7-8% di RAP in tutte le miscele. La fresatura non è ampiamente utilizzata in Norvegia quindi la fornitura di RAP è limitata.

-In Germania ci sono stati casi studio dove la pavimentazione è stata completata mentre le temperature ambientali oscillavano attorno ai 3 e 4°C. La temperatura del mix era 102-139°C e la miscela conteneva il 45% di RAP.

-Viene riportato anche l'esempio in cui un mix additivato con Sasobit è stato trasportato fino a 9 ore in Australia e il materiale era ancora in grado di essere compattato. Quindi le attuali temperature di produzione per miscele WMA prodotte durante la stagione fredda variano a seconda della tecnologia WMA, delle condizioni ambientali e della distanza.

- la tecnologia WMA può essere utilizzata per sistemare rattoppi profondi come quelle presenti durante la ripavimentazione dell'aeroporto di Francoforte. Per questo tipo di intervento è stato utilizzato il Sasobit.

Fondamentale quindi è la capacità di ottenere una miscela compatta con meno sforzo garantendo comunque la densità prevista in produzione. Una migliore compattazione e quindi una maggiore densità tende a ridurre la permeabilità e quindi migliorare le prestazioni in termini di resistenza e suscettibilità all'umidità.

2.1.4. RIDUZIONE ESPOSIZIONE LAVORATORI

Test sui fumi e sugli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) indicano significative riduzioni se comparati agli HMA e i risultati mostrano una riduzione del 30-50%.

Gli IPA sono inquinanti che generano allerta perché alcuni composti sono stati identificati come cancerogeni, mutageni e teratogeni. Pur essendo lo studio di queste miscele particolarmente complesso, è stato comunque dimostrato che l'esposizione alle miscele IPA comporta per effetto dei fenomeni di azione sinergica, un aumento dell'insorgenza del cancro, soprattutto in presenza di benzo(a)pirene, composto presente in miscela.

Quando si riscalda un bitume o un materiale bituminoso vengono a prodursi fumi, costituiti in parte da vapori e in parte da particolato aeriforme. Il calcolo analitico viene eseguito tramite campioni su filtro mentre i vapori sono catturati con un tubo assorbente posto in serie a un campionatore. La temperatura di riscaldamento influenza sia la quantità dei singoli IPA sia la qualità dei fumi generati. Studi hanno confrontato i condensati ottenuti dai fumi generati alle temperature di 160°C e 250°C e hanno reso noto che i fumi ottenuti a temperatura più bassa contengono quantitativi maggiori di IPA a 3-4 anelli mentre fumi ottenuti a temperatura più elevata avevano quantitativi maggiori di IPA a 5 anelli. Quindi la quantità di fumi emessa a 250°C è circa otto volte superiore rispetto a quella emessa a 160°C.

Esiste un regolamento europeo che concerne la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche (REACH) con lo scopo principale di migliorare la conoscenza dei pericoli e dei rischi derivanti da sostanze chimiche già esistenti. Tale regolamento è il n. 1907/2006 del Parlamento Europeo del Consiglio del 18 dicembre 2006.

Anche i leganti bituminosi rientrano in questo regolamento. Tale regolamento richiede che i fornitori chimici devono segnalare ai lavoratori i vari livelli di esposizione (DNEL).

Il DNEL è il livello di esposizione alla sostanza sopra il quale l'uomo non dovrebbe essere esposto. Praticamente il DNEL misura il potenziale della sostanza di causare effetti avversi alla salute.

2.2. CLASSIFICAZIONE WMA

Nel maggio 2007, un team di 13 esperti in materiali provenienti dagli Stati Uniti visitarono quattro paesi europei (Belgio, Francia, Germania e Norvegia) per valutare le varie tecnologie WMA. Il team studiò una vasta gamma di tecnologie, discussero con varie imprese come e perché sono state attuate questi nuovi prodotti e visitarono diversi cantieri.

Sono state concordate, in seguito alla loro visita, due tipologie di classificazione: una in base al range di temperatura di produzione del mix e una per tipologia di processo.

2.2.1. CLASSIFICAZIONE PER RANGE DI TEMPERATURA

- Warm Mix Asphalt (WMA): temperatura di produzione e posa a 30-40°C inferiore alla temperatura degli hot mix asphalt tradizionali;
- Half Warm Asphalt (HWA): temperatura di produzione e di posa sotto ai 100°C.

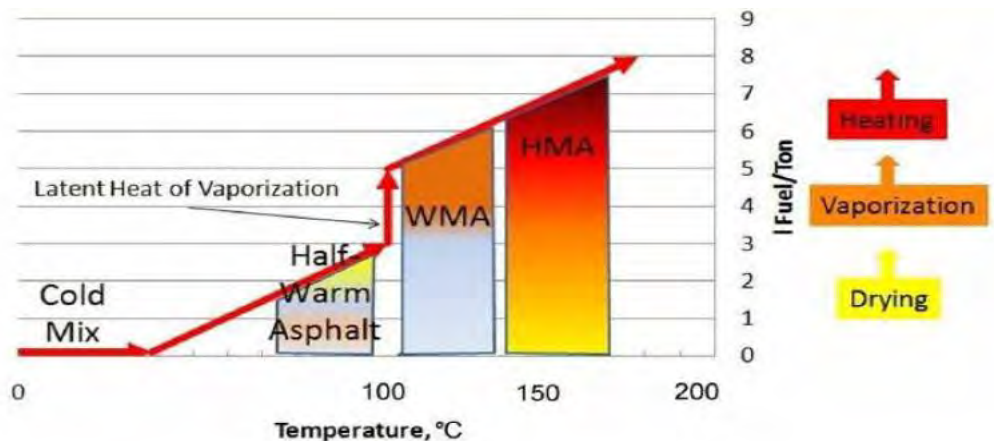


Figura 2.2. Classificazione in base al range di temperatura

2.2.2. CLASSIFICAZIONE IN BASE AL PROCESSO DI PRODUZIONE

- Processo tramite schiumatura:

questi processi introducono piccole quantità d'acqua nel conglomerato caldo, sia attraverso un prodotto schiumogeno o un materiale idrofilo come la zeolite o aggregato umido. Contano sul fatto che quando un determinato volume d'acqua si trasforma in vapore a pressione atmosferica, si espande di un fattore pari a 1.673 (la quantità d'espansione dipende da diversi fattori tra cui la quantità d'acqua e la temperatura del legante). Quando l'acqua si disperde nel conglomerato e si trasforma in vapore (nel contatto appunto con l'asfalto caldo), si ha una corrispondente riduzione della viscosità della miscela. Il processo quindi può essere sviluppato con:

- additivi inorganici (zeolite sintetica come Aspha-Min, Advera);
- bicomponenti (WAM-Foam)

- Processo con l'utilizzo di additivi organici:

vengono utilizzati in questo processo degli additivi dall'alto peso molecolare (ad esempio la cera Fischer-Tropsch, miscele di cera Montan o ammidi di acidi grassi) che inducono una diminuzione della viscosità. Il tipo di cera deve essere selezionato accuratamente in modo che il punto di fusione della cera sia superiore alla temperatura di servizio del manto stradale (altrimenti potrebbero formarsi deformazioni indesiderate) minimizzando così la fragilità dell'asfalto a basse temperature.

La maggior parte dei polimeri e idrocarburi hanno una catena principale flessibile di atomi di carbonio. La lunghezza della catena di carbonio è correlata al peso molecolare e viene spesso indicato come C_x , dove C sta per un atomo di carbonio e il pedice X indica la lunghezza della catena di carbonio. Additivi organici sono tipicamente cere sulle dimensioni molecolari superiori a C_{45} e punto di fusione superiore a 70°C . Catene di carbonio più lunghe tendono a portare il punto di fusione più alto.

- Nuove tecnologie emergenti negli Stati Uniti

2.3. PRODOTTI WMA

Qui in seguito vengono elencate le varie aziende che operano in questo settore differenziandole per tipologia di WMA.

2.3.1. ADDITIVI ORGANICI

Wma process	Additivo	Temperature di produzione	Uso nei Paesi	Tonnellate approssimate e data
Sasobit (cera Fisher-Tropsch)	Si, in Germania si aggiunge circa il 2,5% sul peso del bitume. In America i dosaggi sono circa 1-1,5%	Variano attorno ai $20-30^{\circ}\text{C}$ inferiori a quelle degli HMA.	Germania e altri 20 paesi nel mondo	Più di 10 tonnellate a livello mondiale
Asphatan-B (cera Montan)	Si, in Germania si aggiunge circa il 2,5% sul peso del bitume.	Variano attorno ai $20-30^{\circ}\text{C}$ inferiori a quelle degli HMA.	Germania	Non precisato
Licomont BS 100	Si, circa il 3% sul peso del bitume	Variano attorno ai $20-30^{\circ}\text{C}$ inferiori a quelle degli HMA.	Germania	Più di 322500 metri quadrati dal 1994

Tabella 2.2 Additivi organici

- SASOBIT: è una cera Fischer- Tropsch ovvero cere di paraffina che vengono prodotte scaldando carbone e gas naturale con dell'acqua alla temperatura di 180 a 280°C in presenza di un catalizzatore. Queste cere sono una lunga catena idrocarburica alifatica sintetica altamente viscoso a basse temperature. La lunghezza delle molecole idrocarburiche del Sasobit variano da C_{40} a C_{120} . La piccola struttura cristallina della cera riduce la fragilità alle basse temperature rispetto alle macro strutture cristalline delle cere di paraffina bituminosa. La cera Sasobit ha un intervallo di fusione attorno ai $70-114^{\circ}\text{C}$, mentre la penetrazione della cera a 25°C è inferiore a 1 dmm.

Si solidificano nel conglomerato tra i 65 e 115°C in modo regolarmente distribuito in particelle microscopiche a forma di bastoncini. Si ritiene che questa particolare disposizione delle particelle a bastoncino permette un aumento della viscosità del legante col Sasobit alle temperature di servizio. La cera Sasobit può anche essere premiscelata con il legante quindi mescolata assieme allo stato fuso oppure aggiunta durante il processo di miscelazione sotto forma di palline. In Germania, viene aggiunta circa il 2.5% di Sasobit sulla massa totale del legante. Superare il 3% causerebbe un irrigidimento alle basse temperature. Invece negli Stati Uniti viene aggiunta una percentuale attorno al 1-1,5%.

-ASPHALTAN-B: è una cera Montan raffinata, miscelata con un'ammina di acido grasso. La cera Montan è una combinazione di una lunga catena non gliceride di acidi esteri carbossilici, di acidi organici, di alcoli, di chetoni, idrocarburi e resine. Il punto di fusione è a 82-95°C. Anche nota come cera di lignite o cera OP, la cera Montan si ottiene estraendo con un solvente alcuni tipi di lignite o carbone marrone.

La cera Montan è usata anche per lucidare scarpe, auto, vernici e come lubrificante per la stampa su carta e plastica. Da notare che la cera Montan grezza può contenere asfalti e resine che possono essere rimossi tramite raffinazione.

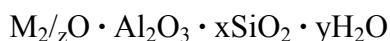
-LICOMONT BS 100: è un'ammina di acido grasso. Tipicamente il punto di fusione è compreso tra 141-146°C. Prodotti simili sono stati utilizzati per modificare l'asfalto per diversi anni e sono disponibili in diverse forme. Questi ammidati sono stati utilizzati nelle pavimentazioni asfaltiche dalla fine degli anni 70' agli inizi degli anni 80'. Licomont è disponibile come polvere o in forma granulata.

2.3.2. PROCESSI DI SCHIUMATURA

Wma process	Additivo	Temperature di produzione	Uso nei Paesi	Tonnellate approssimate e data
Aspha-min (zeolite)	Si, circa lo 0,3% sul peso totale del mix	Variano attorno ai 20-30°C inferiori a quelle degli HMA.	Francia, Germania e U.S.	Circa 300000 tonnellate
ECOMAC	Si però non è definito il tipo e la quantità	Circa 45°C inferiore a quelle degli HMA	Francia	Non dichiarato
LEA	Si, circa lo 0,2-0,5% sul peso del bitume	Inferiori ai 100°C	Francia, Spagna, Italia e U.S.	Più di 100000 tonnellate
LEAB	Si, circa lo 0,1% sul peso del bitume	90°C	Paesi Bassi	Sette progetti commerciali
LT asphalt	Si, circa lo 0,5-1% di filler	90°C	Paesi Bassi e Italia	Non dichiarato
WAM-Foam	Non necessario	110-120°C	Francia, Norvegia, Canada, Italia, Lussemburgo, Paesi Bassi, Svezia, Svizzera e Inghilterra	Più di 60000 tonnellate

Tabella 2.3. Processi di schiumatura

-ASPHA-MIN: è una zeolite sintetica composta da alluminio-silicati. La struttura delle zeoliti è caratterizzata dalla presenza di silicati con grandi spazi vuoti che permettono la presenza di grandi cationi, come sodio e calcio. Esse permettono anche la presenza di grandi gruppi cationici, come molecole di acqua. La maggior parte delle zeoliti sono caratterizzate dalla capacità di cedere e assorbire acqua senza danneggiare la loro struttura cristallina. Aspha-min è un alluminosilicato sintetico, la cui formula chimica è:



Esso contiene circa il 20% d'acqua di cristallizzazione che viene poi rilasciato una volta incrementata la temperatura. Tipicamente viene aggiunto alla miscela lo 0,3% in peso di zeolite. Quando miscelata con inerti caldi o asfalto, la zeolite rilascia acqua e crea quindi una nebbiolina d'acqua molto fine. L'acqua crea un effetto schiumogeno controllato che porta a un leggero aumento del volume di legante, riducendo la viscosità del mix. Il rilascio graduale d'acqua fornisce, per un periodo di 6-7 ore una migliore lavorabilità che dura fino a quando la temperatura scende al di sotto dei 100°C.

L'Aspha-min, distribuito negli Stati Uniti, deve essere aggiunto quando il legante viene unito alla miscela. Può essere aggiunto manualmente o tramite una piccola tramoggia. In un mixer a tamburo, l'Aspha-min viene soffiato nella camera di miscelazione usando un alimentatore pneumatico.

-ECOMAC: non si hanno molte informazioni su questa tipologia di processo. È una miscela tradizionale fredda che viene preparata utilizzando un'emulsione. La miscela fredda viene poi immagazzinata finché non è pronta da posare. Poi viene riscaldata per migliorare la compattazione e quindi le proprietà meccaniche.

-LEA LOW ENERGY ASPHALT: esistono 2 processi brevettati sequenziali di miscelazione: "enrobé à basse énergie" (EBE - conglomerato steso a bassa energia) ed "enrobé basse température" (EBT - conglomerato steso a bassa temperatura). Questi due processi sono stati sviluppati da Fairco e Eiffage Travaux Publics, rispettivamente, per produrre i WMA. Queste due società stanno cooperando insieme per promuovere e commercializzare asfalto a bassa energia (LEA) in Europa, Nord America, e alcuni altri paesi: la LEA-CO.

In questo processo LEA, l'aggregato grosso viene asciugato e rivestito con l'asfalto caldo e poi la sabbia bagnata viene introdotta nella miscela. L'umidità nella sabbia crea un effetto schiumatura sull'asfalto, consentendo quindi alla sabbia di essere ricoperta.

La temperatura della miscela risultante è inferiore ai 100° C.

In sintesi vengono elencate le fasi del processo:

- L'aggregato è diviso in due frazioni: aggregato grossolano e sabbia di varia granulometria senza fini;

- L'aggregato grosso e le particelle di sabbia vengono essiccate a 150°C;

- Il legante viene riscaldato a una temperatura normale di miscelazione. Appena prima dell'iniezione nell'impianto per la miscelazione, un additivo appositamente formulato viene aggiunto al legante in modo tale da regolare l'espansione della schiuma;

- L'aggregato grossolano caldo e secco viene rivestito con tutto l'asfalto che deve essere aggiunto alla miscela. L'aggregato grossolano e la sabbia dovrebbero costituire circa il 60% della miscela ;

- Il restante 40% dell'aggregato, costituito da sabbia bagnata e fini con circa il 3% in peso di umidità, viene miscelato con l'aggregato grosso. Entrambi vengono infornati e l'aggregato fine umido viene aggiunto attraverso un sistema di alimentazione separato.

Questo fa sì che l'umidità si trasformi in vapore e quindi si ha la trasformazione in schiuma che a sua volta incapsula l'aggregato più fine. Il mix finale equilibrato avrà una temperatura inferiore ai 100°C. Infine, all'aggregato fine viene tipicamente aggiunto dell'asfalto riciclato (RAP).

-Se l'aggregato fine è troppo secco, viene aggiunta dell'acqua supplementare utilizzando un sistema a spruzzo. Se l'aggregato fine è troppo bagnato, una parte dell'aggregato può essere deviata verso l'essiccatore assieme all'aggregato grossolano. Il residuo, ovvero l'umidità ricondensata nella miscela presente in minuscole goccioline, aiuta a mantenere la lavorabilità anche a basse temperature.

-LEAB: è un processo sulla commercializzazione di asfalti semi tiepidi (HWA). Questo è l'unico processo, diversamente da ECOMAC, che non riscalda almeno una porzione dell'aggregato a temperature sopra il punto di ebollizione dell'acqua. L'aggregato grezzo viene riscaldato a circa 95°C. Il RAP invece viene riscaldato in un essiccatore cilindrico ma separato a 110-115°C. Durante le prove per valutare il contenuto d'umidità dell'aggregato, è stato osservato che il contenuto di umidità nei fini/filler è circa il 2,2%. Pertanto, l'impresa che ha sviluppato il mix, BAM, ha aggiunto un bruciatore supplementare per essiccarlo. Un additivo viene aggiunto al legante immediatamente prima della miscelazione (tramite processo di schiuma tura) per garantire un rivestimento e quindi adesione. Questo additivo permette di incrementare la durata della schiuma che quindi tende a incrementare la lavorabilità.

-LT-ASPHALT: l'azienda utilizza uno speciale processo di schiumatura in combinazione con circa lo 0,5-1,0% di idrofilo di filler che aiuta a controllare l'umidità della schiuma. Gli aggregati vengono così riscaldati a 90°C. Poi uno speciale legante di penetrazione viene espanso con particolari ugelli e in seguito viene mescolato con gli aggregati il riempitivo.

-WAM-FOAM: Nel 1996, la Shell Bitum ha sviluppato un asfalto tiepido (WAM) con alla base il concetto di una miscelazione tipicamente dura con componenti morbidi dei leganti per ridurre la temperatura di produzione. In collaborazione con la norvegese Kolo-Veidekke ha portato questo progetto in una nuova direzione, aggiungendo una componente bituminosa dura come la schiuma. Si è concretizzato così lo sviluppo del processo Wam-Foam, che ora è coperto da brevetto e commercializzato in tutto il mondo (tranne negli Stati Uniti) da Shell Bitumen.

Wam-Foam è un processo, non un additivo o un materiale. E' riferito a una pratica comune in Norvegia per ottenere un legante di 2 qualità: uno nominalmente morbido e uno nominalmente duro.

Il legante morbido rappresenta in genere il 20-30% del contenuto totale di legante. Il grado del legante risultante, assumendo un 20% di quello morbido e un 80% di quello più rigido, avrebbe un range di penetrazione nominale 70/100 ma non invecchiato.

Il legante più duro viene espanso nella miscela con l'aggiunta di acqua fredda di una percentuale pari al 2% della massa del legante a circa 180°C. L'acqua permette l'espansione quando viene a contatto col legante caldo e quindi si trasforma in vapore. Questo fa sì che la combinazione legante-acqua risultante possa espandersi di un fattore di circa 15 volte il suo volume originale. Il rivestimento dell'aggregato grosso con il legante morbido è atto a soddisfare l'assorbimento nell'asfalto degli aggregati più grossi, che non potrebbe verificarsi con un legante più rigido a bassa temperatura.

La temperatura della miscela risultante è compresa tra 100 e 120°C.

2.3.3. TECNOLOGIE EMERGENTI negli STATI UNITI

Wma process	Additivo	Temperature di produzione	Uso nei Paesi	Tonnellate approssimate e data
Evotherm	Si	85-115°C	Francia, Canada, Cina, Sud Africa e U.S.	più di 17000 tonnellate
Double-Barrel Green	Non necessario	116-135°C	U.S.	più di 4000 tonnellate
Advera	Si, circa lo 0,25% sul peso del mix	Variano attorno ai 20-30°C inferiori a quelle degli HMA.	U.S.	più di 10000 tonnellate

Tabella 2.4. Tecnologie emergenti negli U.S.A.

-EVOTHERM: Evotherm è un pacchetto chimico progettato per favorire l'adesione, il rivestimento, la compattazione e la lavorabilità di miscele d'asfalto a temperature più ridotte. Diversi pacchetti chimici sono disponibili per diversi tipi di aggregazione. La differenza principale tra i pacchetti chimici sono gli agenti di adesione. Un componente del pacchetto chimico è un tensioattivo, che agisce come un'emulsionante. Circa il 50% del pacchetto chimico è derivato da fonti rinnovabili. Evotherm permette di abbassare le temperature di produzione e di posizionamento, rispetto all'HMA, di circa 50°-75°C. L'emulsione prodotta ne conferisce le proprietà poco prima elencate. La maggior parte dell'acqua nell'emulsione si trasforma in vapore quando quest'ultima viene miscelata con gli aggregati. Un nuovo processo è stato sviluppato chiamato "dispersed asphalt technology" (DAT) in cui questo pacchetto chimico viene diluito con una piccola quantità d'acqua per poi essere iniettato nell'asfalto appena prima della miscelazione.

Uno dei principali vantaggi del processo DAT è che riduce i costi di trasporto rispetto all'emulsione e permette all'impresa di passare rapidamente da HMA a WMA.

-DOUBLE BARREL-GREEN: L'azienda statunitense Astec Industries ha sviluppato un dispositivo di schiumatura a multiugelli progettato per lavorare con i sistemi Double Barrel. Il sistema è costituito da una serie di valvole, camere di miscelazione e un collettore dotato di 10 ugelli. Il collettore d'asfalto è circondato da una camicia d'olio caldo. Ogni ugello è progettato per fornire schiuma sufficiente per la miscelazione di 50t all'ora di WMA. Un sistema controllato tramite computer regola il numero di ugelli impiegati in base al tasso di produzione. Una pompa volumetrica controlla l' iniezione d'acqua. Le temperature di produzione tipiche sono 135°C. Test condotti da Astec indicano che la produzione di composti organici volatili può essere significativamente ridotta se le temperature sono mantenute al di sotto di 141°C.

-ADVERA: è una zeolite sintetica prodotta dalla PQ Corporation. Essa è simile ad "Aspha-min", zeolite descritta sopra (infatti può essere aggiunto allo stesso modo). Advera ha una granulometria più fine rispetto ad Aspha-min, col 100% del peso passante al setaccio 0,075mm. PQ Corporation sta ora lavorando su un processo per miscelare l'Advera con il legante mentre quest'ultimo viene steso anziché semplicemente soffiando nella la camera di miscelazione. Con questo processo si pensa di ottenere un WMA più consistente.

3. MATERIALI PER INFRASTRUTTURE STRADALI

Per la progettazione stradale, le tecniche di costruzione appartengono a diversi settori disciplinari tra loro molto diversi, come l'ingegneria stradale (geometrie della strada, sovrastrutture), l'ingegneria strutturale (attraversamenti e sostegni) e l'ingegneria geotecnica (stabilità dei corpi stradali e opere di fondazione). Quindi è necessario conoscere la natura e le caratteristiche geomeccaniche dei terreni interessati.

3.1. LE TERRE

La terra, insieme di granuli minerali e/o organici separabili mediante debole azione meccanica, è il derivato dall'alterazione di uno substrato roccioso per azione chimica, fisica e biologica. È un sistema trifasico ovvero una terna costituita da una parte solida (componente organica e minerale), una parte liquida e da una parte gassosa, e a seconda della granulometria può essere contraddistinta da due tipologie di comportamento:

- incoerente o sciolta, sono terre a granulometria grossolana in cui prevalgono le azioni di massa. Sono costituite da granuli sciolti senza alcun apparente legame. Appartengono a questa macro categoria le sabbie e le ghiaie (dette anche terre granulari). Hanno la caratteristica di resistere più o meno bene ai carichi in relazione al loro grado di addensamento che determina un maggiore o minore mutuo contrasto tra i vari granuli (sabbie ben costipate sono idonee a sopportare apprezzabili deformazioni);

- pseudo-coerente, sono terre a granulometria fine in cui prevalgono le interazioni di superficie. Queste terre hanno la possibilità di resistere a sforzi di taglio. Sono costituite da granuli molto piccoli in cui la coesione è dovuta non tanto all'azione mutua fra i granuli, quanto alle tensioni superficiali determinate dalle pellicole di acqua che inglobano i granuli stessi. Fanno parte a questa categoria i limi e le argille. Qui le proprietà di indeformabilità e di resistenza ai cedimenti dipendono essenzialmente dal contenuto d'acqua dell'agglomerato.

Per terreno si intende invece la parte più superficiale del sito cioè il terreno organico che non presenta sufficienti caratteristiche fisico-meccaniche per poter essere usato nella pavimentazione stradale.

3.2. I MATERIALI IN AMBITO STRADALE

I materiali utilizzati possono essere classificati come:

-MATERIALI TRADIZIONALI: sono i materiali più utilizzati nelle infrastrutture stradali. In questa categoria fanno parte gli aggregati lapidei. A differenza delle costruzioni civili (dove vengono utilizzati leganti idraulici) nella costruzione e stesa delle pavimentazioni stradali si usano leganti idrocarburici. Nella quasi totalità dei casi il legante più utilizzato è il bitume anche se non manca l'utilizzo di leganti idraulici come nelle pavimentazioni rigide. A differenza dei leganti impegnati nelle costruzioni civili, è bene ricordare come i leganti in campo stradale non sono colabili: infatti presentano caratteristiche granulari per un'adeguata compattazione, ottenuta tramite macchine vibro-finitrici e successivamente compattate mediante rulli compressori.

Anche il conglomerato bituminoso, che va a costruire lo strato di usura della pavimentazione stradale, deve essere steso e poi compattato.

Altro materiale molto utilizzato è il filler, costituito dalla parte fine ovvero $D < 0.075\text{mm}$ dell'inerte. Esso è considerato come materiale riempitivo consentendo quindi di ottenere una miscela con una bassa percentuale di vuoti, infatti quest'ultimi sono responsabili di ulteriori cedimenti e deformazioni permanenti, oltre che a consentire un'infiltrazione dell'acqua.

-MATERIALI ALTERNATIVI: sono materiali di origine naturale o artificiale che non vengono normalmente utilizzati. Tra questi si trovano materiali che provengono da attività umane nelle quali hanno esaurito la loro vita utile come per esempio le loppe d'altoforno e materiali di riciclo. Solitamente il loro impiego ha come obiettivo la riduzione del conferimento di materiale in discarica e la riduzione dell'estrazione di materiali vergini.

-MATERIALI INNOVATIVI: sono tutti quei materiali che vengono aggiunti alle miscele sotto forma di additivi in modo tale da ottenere leganti bituminosi additivati o modificati. L'aggiunta può essere naturale o artificiale. Fanno parte di questa categoria anche leganti organici come le resine o i polimeri. L'additivazione permette di incrementare le prestazioni del legante originario.

-MATERIALI DIVERSI: fanno parte di questa categoria i geotessuti e le reti metalliche. Quest'ultime vengono utilizzate per risolvere il problema della trazione per flessione anche se l'obiettivo principale è il macrorinforzo. Non hanno compiti strutturali ma servono a prolungare la vita utile della pavimentazione. L'utilizzo di questi materiali prevede un'adeguata attenzione nel posizionamento della rete: deve quindi essere garantita la continuità strutturale tra i vari strati della pavimentazione.

3.2.1. MATERIALI TRADIZIONALI: GLI AGGREGATI LAPIDEI

Nel settore delle costruzioni generalmente l'aggregato lapideo, miscelato con i leganti idraulici o organici, occupa circa il 60÷100% in volume della miscela. Gli ambiti di utilizzo nel settore dei trasporti sono svariati: fondazioni, conglomerati bituminosi e cementizi, massicciate ferroviarie. In base all'origine, l'aggregato lapideo può essere suddiviso in:

- aggregati lapidei naturali fluviali: caratterizzati da spigoli arrotondati;
- aggregati lapidei di frantumazione: presentano una superficie spigolosa consentendo di ottenere maggiori livelli d'attrito interno.

Le rocce dell'aggregato lapideo provengono generalmente da rocce ignee, sedimentarie o metamorfiche.

- ignee: si originano per raffreddamento di masse incandescenti. Sono rocce idonee in base alla loro durezza, resistenza e al contenuto di silice. Un alto contenuto di silice però può compromettere l'uso di materiali nell'ambito di miscele bituminose in quanto si hanno problemi di adesione. Ottime sono le caratteristiche di resistenza e durezza, idonee negli strati superiori delle pavimentazioni. Porfidi, graniti e basalti appartengono a questa categoria.

- sedimentarie: si originano per accumulo di detriti, precipitazioni chimiche nel mare, attività biochimiche di organismi. I calcari sono le principali rocce sedimentarie. Hanno caratteristiche medie e vengono utilizzate negli strati inferiori della fondazione. Usate anche negli strati d'usura, data la loro media resistenza, questo tipo di rocce vengono molte volte sostituite laddove si hanno sollecitazioni particolarmente intense. Appartengono a questa categoria anche le dolomie, ma, anche se hanno una resistenza maggiore dei calcari, possono essere scivolose se mixate con un legante idraulico.

- metamorfiche: si originano dalla sedimentazione per effetto di calore, pressione e/o attività chimiche. Divise in scistose e non scistose, trovano maggior impiego quest'ultime date le loro proprietà meccaniche di resistenza e durezza.

3.2.2. I MATERIALI TRADIZIONALI: FILLER

Il filler assume una rilevante posizione nel settore delle costruzioni. È la frazione più fine dell'aggregato passante per il setaccio più piccolo per fare l'analisi granulometrica. Solitamente le sue dimensioni sono inferiori agli 0,075mm. Sono però consentite delle tolleranze ovvero al 100% passante al setaccio da 0,18mm e all'80% passante al setaccio da 0,075mm. Generalmente il filler viene utilizzato come materiale riempitivo dei vuoti lasciati dagli elementi più grossolani della miscela. Oltre a questo, il filler viene utilizzato per garantire una certa plasticità al conglomerato una volta legato col bitume. Il filler può essere di origine naturale o sintetica.

Nel primo caso si ha disposizione un filler di calcare o proveniente da rocce asfaltiche (bisogna quindi a fare attenzione che non sia ricco di bitume poiché comporterebbe una modifica alla progettazione della miscela). Tra i filler sintetici invece si trova il cemento, ma solitamente non viene mai utilizzato come riempitivo (per i suoi costi). Viene usato in maniera particolare nelle miscele schiumate, dove permette una migliore dispersione del bitume all'interno della miscela.

3.2.3. MATERIALI ALTERNATIVI

Oltre gli aggregati lapidei naturali vi sono in commercio anche materiali di tipo non convenzionale.

Tra questi compaiono gli inerti di carattere artificiale e di riciclo. Un esempio possono essere:

- scorie siderurgiche: queste possono essere molto diverse tra loro a seconda di dove sono prodotte e per come sono state ottenute (per esempio la metodologia di raffreddamento);
- residui di demolizioni e costruzione: malte, materiali cementizi, laterizi e ceramici;
- scarti di cava e miniera, come per esempio la roccia di scavo ovvero aggregati di risulta;

Chiaramente l'obiettivo dell'uso di questi materiali è diminuire l'apporto in discarica e quindi diminuire l'utilizzo dei materiali vergini. Con l'uso di questi materiali si deve mantenere:

- l'idoneità dell'opera: si deve considerare le prestazioni finali quindi passare da un ragionamento prescrittivo, dove vengono fissati parametri reologici e meccanici costituenti, a una filosofia prestazionale ovvero ciò che conta è il risultato finale. La filosofia prestazionale quindi permette l'utilizzo di materiali che altrimenti sarebbero scartati dalla filosofia prescrittiva.
- la convenienza economica: tale è certamente da ricercare anche se non sempre garantita.
- compatibilità tossicologica: il materiale marginale deve essere fisicamente e chimicamente inerte (aspetto fondamentale). Bisogna quindi prestare attenzione qualora i materiali sono utilizzati negli starti non legati dove per dilavamento possono essere rilasciate sostanze come cadmio, cromo, nichel, mercurio, selenio e piombo. Da tenere in considerazione è la presenza di residui organici all'interno di questi materiali perché, se si dovessero decomporre, potrebbero lasciare vuoti all'interno della miscela (problemi di cedimenti e di scarsa compattazione).

I vantaggi di questi elementi alternativi/marginali sono:

- diminuzione del conferimento in discarica;
- chiusura di cave;
- riduzione del costo di trasporto;
- possono conferire prestazioni anche migliori dei materiali tradizionali.

Tra i materiali alternativi si fa gran uso delle scorie provenienti dalla produzione siderurgica. Si parla quindi di loppe di altoforno (provenienti dalla produzione del cemento) e da scorie d'acciaieria (provenienti da forno ad arco elettrico EAF). Queste presentano caratteristiche meccaniche comparabili a quelle dei migliori aggregati naturali (come porfidi e basalti).

Altri aggregati sono le sabbie di fonderia che derivano dai refrattari di contenimento. Hanno la caratteristica di assorbire molto bitume.

Facendo riferimento sempre ai materiali marginali si hanno i materiali provenienti dalle costruzioni civili e dalle demolizioni. Definito aggregato C&D è il materiale marginale più diffuso anche se presenta basse caratteristiche prestazionali e di omogeneità. In questa tipologia di aggregato è presente un buon quantitativo di laterizio: data questa caratteristica, il materiale è parecchio poroso quindi ne è sconsigliato l'utilizzo col bitume in quanto potrebbe essere assorbito. Un buon uso è con i misti cementati o negli strati non legati. Dal punto di vista ambientale, se la tossicità di alcuni materiali è tollerata all'interno di un'abitazione, tanto meglio può esserlo all'interno di un pacchetto stradale. Quindi questo comporterebbe una fase di selezione e quindi un dispendio monetario: devono essere eliminate qualsiasi tipologia di impurità quindi terre vegetali, legname, metalli, gessi e amianto.

Oggi si tende a riciclare anche le stesse pavimentazioni: un altro materiale marginale è appunto il fresato. Tramite il processo di fresatura si ottiene un granulato ricco di parti fini.

Altro materiale marginale è il granulato di gomma ottenuto tramite macinazione dei pneumatici. Essendo un materiale molto voluminoso, genera fenomeni di instabilità all'interno delle discariche occupando molto spazio. Per produrre il granulato di gomma viene utilizzata solamente la miscela della gomma mentre il resto della carcassa non viene considerato nella fase di riciclo. Anche se queste operazioni inducono a un'ingente costo in denaro, questa tipologia di aggregato è ottima sia per l'additivazione sia per la modifica.

Altri materiali marginali possono essere materiali di scarto come le ceneri volanti/pesanti. Hanno un peso specifico simile al calcare e si trattano di rifiuti (scorie) provenienti dagli inceneritori. Avendo caratteristiche simili al materiale granulare, è comunque buona norma eliminare da questo aggregato tutti i materiali inquinanti (ovvero residui metallici, carta e tessili). Hanno però scarsa compatibilità ambientale e quindi questi materiali devono essere usati sempre in miscele legate quindi non si usano mai nei sottofondi.

3.3. LE SCORIE EAF

La richiesta di pavimentazioni stradali sempre più sicure e performanti e l'attenzione crescente verso le tematiche ambientali implica una ricerca continua di nuovi materiali e nuove tecnologie per il miglioramento dei manufatti e la salvaguardia delle risorse naturali. Il settore siderurgico rappresenta un'attività che potenzialmente è in grado di esercitare una notevole pressione sull'ambiente a causa delle quantità di materiali coinvolti o della loro natura. Come è noto nell'industria siderurgica, ogni volta che si produce ghisa o acciaio si ottiene, come sottoprodotto, un certo quantitativo di scoria. I primi utilizzi della scoria d'acciaieria risalgono agli inizi del 1900 negli Stati Uniti dove veniva utilizzata per la costruzione del ballast ferroviario e aggregato per il calcestruzzo. Nel 1939 il quantitativo di scoria prodotta era pari a 8.3milioni di metri cubi, per un valore di 6.4milioni di dollari. Una prima statistica nel 1947 le scorie ammontavano a 30 milioni di metri cubi. Nel 2000, 8.9 milioni di tonnellate di scorie d'altoforno erano valutati 58.3milioni di dollari e 5.1milioni di tonnellate di scorie d'acciaieria erano valutati 20.1milioni di dollari. Questo lascia capire l'importanza e i costi di questo materiale, che diversamente andrebbe gettato in discarica.

Sicuramente grazie al progresso tecnologico negli anni si è ridotta la produzione unitaria di scoria anche grazie a una più accurata scelta della carica degli altiforni. I quantitativi però attuali difficilmente potranno essere ancora ridotti o addirittura annullati. Comunque fosse le procedure sono orientate a prevenire e ridurre le quantità di materiale residuale dei processi produttivi in modo tale da minimizzare le ripercussioni negative sull'ambiente e sui costi. Infine, la tendenza attuale è quella di valorizzare tali scarti, intesi fino a ora come rifiuti e quindi associati a inevitabili costi di smaltimento.

Gli ambiti di applicazione dell'aggregato artificiale ottenuto per lavorazione della scoria siderurgica sono del tutto simili a quelli degli inerti naturali. Le caratteristiche fisico-meccaniche dell'aggregato ottenuto dalla scoria non si discostano molto dalle caratteristiche dell'aggregato naturale.

Le differenze più rilevanti sono :

- peso specifico, che nel caso della scoria può essere superiore rispetto a quello dell'inerte naturale, a causa del più alto contenuto di ossidi di ferro;
- colore, che paragonato con un materiale inerte di tipo calcareo, è decisamente più scuro.

La scoria, per poter essere impiegata come aggregato, viene portata alle dimensioni specifiche per diversi tipi di applicazione,

3.3.1. PRODUZIONE ACCIAIO

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;
- 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.

Quindi dalla lavorazione dei metalli ferrosi si ottengono:

- scorie d'acciaieria;
- loppe d'altoforno.

Le loppe d'altoforno sono costituite, oltre dall'acciaio presente nel minerale fuso, anche da ceneri contenute nel calcare e nel carbon coke. Di loppe ne vengono prodotte circa 290 kg, per ogni tonnellata di acciaio.

Le scorie invece provengono dal processo di produzione dell'acciaio e sono circa 100-120kg per tonnellata d'acciaio prodotta. Il principale costituente delle scorie è il calcio CaO e il silicio SiO_2 . Questi sono presenti anche nei comuni aggregati naturali come le rocce e i minerali. Il costituente principale è il CaO ed è solubile in acqua oltre a essere alcalino come il cemento.

3.3.2. FORNO ELETTRICO EAF

Il forno elettrico ad arco (in inglese EAF, electric arc furnace), 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 dell'ossidazione del rottame e dei composti generati dagli additivi inseriti nella carica del forno elettrico. La scoria di acciaieria varia a secondo 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/alto legato) 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. Un esempio: per 100t di materiale per la produzione dell'acciaio si otterrà un 50 % di scoria tossica un 50% di scorie EAF che sono completamente recuperabili.

In linea generale, le scorie sono costituite per il 90% da ossido di ferro (FeO) e da altri ossidi, come quelli di calcio, magnesio e silicio derivanti dagli additivi usati nella produzione dell'acciaio.

All'interno del ciclo EAF si immettono i rottami con uno scarso livello di omogeneità quindi si introducono degli additivi nel bagno metallico per ottenere l'acciaio desiderato. Parte del bagno poi viene raffreddato (circa il 50%viene eliminato perché contenente ossidi di ferro e altri ossidi). Da questo processo di ottiene una massa microporosa. Quest'ultima è un pregio per la scoria perché riesce a mantenere pesi specifici molto elevati (3500Kg/m^3). La microporosità non va a indebolire la struttura litica del grano nemmeno in presenza del gelo ma, anzi, permette di assorbire molto bitume e quindi può incrementare il film di bitume tra i grani senza effetti negativi sullo scorrimento. Per arrivare a una sorta di stabilizzazione della scoria, il materiale ottenuto deve subire una stagionatura di 2 mesi perché un rapido raffreddamento induce la formazione di anidro di calce e ossido di magnesio che espandono in acqua. Il controllo deve essere effettuato dal produttore sugli aggregati da fusione e devono essere eliminate le eventuali inclusioni di acciaio usando un nastro magnetico.

Gli aggregati vengono allora prodotti secondo tre granulometrie:

- fino (0-4mm)
- medio (4-8)
- grosso (8-12)

I grani sono caratterizzati da un'elevata scabrezza superficiale quindi sono ottimi se utilizzati per gli strati d'usura nella pavimentazione stradale dove sono richieste ottime caratteristiche di aderenza per questioni di sicurezza. Un incremento dalla scabrezza induce un miglior rivestimento del grano da parte del bitume e quindi un incremento della durabilità e della resistenza meccanica.

Da un punto di vista ambientale non sono sempre state ben viste anche se rispetto alle loppe presentano un contenuto in zolfo certamente inferiore. Per l'integrazione ambientale poi le scorie devono essere controllate chimicamente ovvero un controllo della radioattività e della alcalinità. Solitamente le scorie vengono usate per gli strati legati appunto per la loro forma non allungata.

Per evitare il rilascio di metalli pesanti le scorie possono subire un processo di inertizzazione. Oltre ad avere problemi ambientali, si possono riscontrare delle frantumazioni degli strati a causa della forma particolarmente allungata e lenticolare dei grani, anche se la forma dei grani è un problema comune di tutti i materiali marginali.

Diversi studi si sono eseguiti con lo scopo di investigare i rilasci e l'inquinamento prodotto dall'uso di scorie di acciaieria nel settore stradale. In particolari studi si sono concentrati nel valutare i rilasci di Cr e V molto presenti nelle scorie. Dai risultati ottenuti da queste prove è emerso che le concentrazioni di Cr e V sono generalmente basse. Lo studio è stato effettuato su una piattaforma coperta da geomembrane e dotata di un sistema di drenaggi al fine di eliminare l'acqua piovana. Lo stato di ossidazione nel manto è stato studiato tramite uno spettrometro. Sono state realizzate anche infiltrazioni in sito al fine di determinare la quantità di acqua infiltrata, la ritenzione dell'acqua e la conduttività dell'acqua. Dai test è emerso che non sono stati rilevati rilasci tossici dovuti all'acqua nel terreno. Questo permette di affermare che le scorie possono essere impiegate in campo stradale in piena sicurezza anche perchè non verranno mai impiegate da sole ma in presenza di un legante come il bitume che ne limita ancora di più il contatto con l'acqua.

3.3.3. QUADRO NORMATIVO SUI PRODOTTI DI RIFIUTO

Il contesto normativo di riferimento, che coinvolge direttamente o indirettamente l'utilizzo di tale materiale nell'ambito del settore delle costruzioni, tiene presente da un lato la tipologia di scoria a disposizione degli operatori, dall'altro i diversi campi di applicazione (cemento, conglomerati cementizi, conglomerati bituminosi, rilevati stradali, ecc.).

Sebbene la concreta possibilità di utilizzo del materiale debba dipendere essenzialmente dalla sua rispondenza alla normativa tecnica specifica per le diverse applicazioni finali, e dal rigoroso rispetto di tutte le normative in materia di tutela della salute umana e dell'ambiente, non si possono tuttavia trascurare le implicazioni che derivano dalla classificazione "giuridica" del materiale come "rifiuto", "sottoprodotto" o "prodotto".

Ai sensi della normativa attualmente vigente si possono infatti presentare le seguenti situazioni:

- il materiale esce dagli stabilimenti siderurgici come vero e proprio "prodotto";
- il materiale esce dagli stabilimenti siderurgici come "sottoprodotto" in conformità alle condizioni di cui all'art 184-bis del Decreto Legislativo 152/2006;

-il materiale esce dagli stabilimenti siderurgici con la classificazione di “rifiuto” per essere avviato a un’operazione di recupero autorizzata finalizzata a un suo successivo utilizzo, in conformità alle condizioni di cui all’art 184-ter del Decreto Legislativo 152/2006 e del Decreto Ministeriale Ronchi del 05/02/1998.

La Commissione Europea mediante la propria Comunicazione COM(2007)59 ha inteso fornire alcuni criteri di indirizzo utili a distinguere, nell’ambito dei residui derivanti da un processo di produzione, ciò che è rifiuto da ciò che non lo è.

Nella necessità di dare una risposta su come operare una “distinzione tra i materiali che non sono l’obiettivo primario di un processo di produzione, ma che possono essere considerati sottoprodotti non assimilabili a rifiuti, e i materiali che devono invece essere trattati come rifiuti”, la Commissione ha fatto proprie le tre condizioni indicate dalla Corte di Giustizia delle Comunità Europea, perché si possa fare una distinzione il più possibile precisa:

- il riutilizzo del materiale è certo e non solo eventuale;
- il materiale può essere riutilizzato senza che sia preventivamente trasformato;
- la preparazione del materiale per il suo riutilizzo avviene nel corso del processo di produzione.

Il recepimento della Direttiva CE 2008/98 (Direttiva quadro sui rifiuti) nell’ordinamento italiano, ha portato ad introdurre nel D.Lgs. 152/2006 la nuova definizione di “sottoprodotto” (art. 184-bis), che risulta più estensiva rispetto alla precedente e che è direttamente applicabile. Sono state così specificate le condizioni che un residuo di produzione industriale deve possedere, affinché a esso si possa applicare lo status di “sottoprodotto”.

Nel caso in cui un’azienda siderurgica decida di applicare alla propria scoria lo status iniziale di “rifiuto”, è possibile accertare successivamente la rispondenza del materiale a quanto disposto dal nuovo art. 184-ter del D.Lgs. 152/2006 “cessazione della qualifica di rifiuto” (“end of waste”), per poterlo escludere dal campo di applicazione dei rifiuti, al verificarsi di determinate condizioni.

Ciò rappresenta un’ulteriore importante novità apportata dal recepimento della Direttiva 2008/98 CE, per cui un rifiuto cessa di essere tale se, sottoposto a una operazione di recupero, soddisfa anche criteri specifici, dei rifiuti, sin dalla sua generazione, e garantendone un utilizzo nel rispetto della normativa.

Conclusione quadro normativo: se da un lato il concetto di “sottoprodotto” si applica a sostanze o materiali che non entrano mai nel regime dei rifiuti, la nozione di “end of waste” prevede un’operazione di recupero autorizzata sul rifiuto atta a “trasformarlo” in prodotto riutilizzabile. In termini generali si può in ogni caso affermare che sia la nuova nozione di “sottoprodotto” che quella di “end of waste” evidenziano in maniera chiara il più recente orientamento della disciplina comunitaria, inteso a limitare a certe condizioni l’ambito di applicabilità della nozione di “rifiuto”,

nel più ampio contesto della realizzazione della “società del recupero e del riciclo”, che costituisce uno degli obiettivi strategici primari dell’Unione Europea in tema di sostenibilità.

Inoltre, l’avvenuta registrazione presso l’Agenzia Europea delle sostanze chimiche (ECHA) delle diverse tipologie di scorie siderurgiche, ai sensi del Regolamento REACH, Regolamento CE n. 1907/2006, regolamento che si applica a sostanze, preparati e articoli immessi sul mercato, ma non ai rifiuti, ha imposto ai produttori e importatori europei lo studio delle proprietà chimico-fisiche, tossicologiche ed eco-tossicologiche delle sostanze da loro prodotte o importate, allo scopo di presentare un apposito dossier di registrazione all’ECHA e quindi un idoneo utilizzo nel rispetto della tutela della salute umana e dell’ambiente.

3.4. CLASSIFICAZIONE E CURVE GRANULOMETRICHE

Per quanto riguarda la classificazione degli aggregati viene effettuata in base alla curva granulometrica ovvero un diagramma sperimentale ottenuto in seguito al passaggio del materiale campione tramite setacciatura (per frazioni granulometriche grossolane) o sedimentazione (per frazioni granulometriche fini). Gli inerti utilizzati per gli strati della pavimentazione fanno riferimento alla normativa CNR 139/92, per sottofondi si fa riferimento alla normativa italiana UNI 10006. In fig.3 vengono elencate le diverse denominazioni per le rispettive normative di riferimento:

Dimensione granuli	UNI 10006 spigoli arrotondati	CNR 139/92
>71mm	Ciottolo	/
25-71mm	Ghiaia	Pietrisco
10-25mm	Ghiaietto	Pietrischetto
2-10mm	Ghiaino	Graniglia
0,050-2mm	Sabbia	Sabbia
0,005-0.050mm	Limo	<0,075 : Filler
<0,005mm	Argilla	/

Tabella 3.1 Dimensioni granulometriche

Un utilizzo di numerosi tipi di setacci consente una analisi granulometrica più approfondita ma anche più lunga ed onerosa. Le serie di crivelli (fondo in lamiera a fori tondi) e setacci (fondo in rete metallica a maglia quadra) più utilizzate sono la UNI 2334 per i primi e la UNI 2332 per i secondi. Spesso per i setacci è utilizzata anche la serie ASTM.

Crivelli		Setacci		
UNI 2334		UNI 2332		
N.	Dimensioni mm	N.	Dimensioni mm	Tolleranza mm
71	71	2	2.00	0.100
60	60	0.4	0.40	0.020
40	40	0.2	0.20	0.010
30	30	0.18	0.18	0.009
25	25	0.075	0.075	0.004
15	15			
10	10			
7.1	7.1			
5	5			
3	3			
1	1			

Figura 3.0.1. Crivelli e setacci delle serie UNI, dimensioni e tolleranze

Per la determinazione della distribuzione percentuale in peso dei grani secondo le loro dimensioni, per prima cosa viene eseguita la quartatura ovvero una selezione di un campione rappresentativo dell'intero lotto di materiale lapideo. L'obiettivo è quello di ridurre la quantità di materiale in qualcosa di più ridotto e limitato dal punto di vista quantitativo. Dopo di che, una volta messo a essiccare il materiale a 105°C fino a massa costante per eliminare l'acqua interstiziale, vi sono due metodi per la determinazione della curva granulometrica: per via secca o per via umida. Per via secca, o meglio setacciatura, è preferibile per materiali grossolani (in frazioni di mm). Si pesa il materiale prima della prova e poi si disporranno i setacci/crivelli uno sopra l'altro, con retinatura di diametro via via minore e si versa sulla sommità il campione di aggregato da analizzare. Una volta scosso vigorosamente i setacci, filtreranno i materiali più grossolani in alto e via via più fini in basso. Terminata l'operazione, si pesa il materiale raccolto nel fondo di raccolta, sotto l'ultimo crivello, e quello raccolto in ciascun vaglio, a cominciare da quello più fino, sommando i trattenuti progressivamente. Le percentuali di passante ai singoli crivelli si ottengono come rapporto fra peso del trattenuto ai vagli di dimensioni inferiori al peso del provino di partenza.

Va ricordato che i materiali finissimi come argille e limi, non sono analizzabili tramite setacci, poiché sarebbe troppo costoso costruire setacci con retinature finissime. In questo caso si ricorre alla setacciatura per via umida : i materiali fini in questo caso, sempre con setacci impilati, verranno vagliati per mezzo dell'acqua corrente disperdendo i materiali più fini e esaminando poi il materiale sedimentato. Dall'analisi della curva granulometrica di un materiale lapideo è possibile derivarne il tipo e il grado di assortimento delle particelle, cioè quanto le particelle che compongono il campione presentano eterogeneità di dimensioni. Il risultato dell'analisi della curva granulometrica è reso chiaramente più visibile attraverso la creazione di grafici in cui sull'asse delle ascisse verrà riportato il diametro del setaccio/crivello che ha trattenuto il materiale mentre sulle ordinate la percentuale del materiale trattenuto dal rispettivo setaccio.

3.5. PROPRIETÀ FISICHE/MECCANICHE

Sugli aggregati si possono fare diverse prove in modo tale da accertare le proprietà fisiche:

- Peso specifico reale: non considera i vuoti quindi è l'effettivo peso specifico del materiale costituente. È ottenuto tramite una procedura in laboratorio tramite macinazione del campione;
- peso specifico apparente: è minore di quello precedente infatti considera i vuoti normalmente presenti.
- porosità: rapporto tra volume di vuoti e volume totale. Negli interstizi dello scheletro degli aggregati possono essere distinte tre fasi: solida (volume dei granuli), liquida (volume d'acqua) e gassosa (volume dei vuoti). Le loro percentuali all'interno dell'aggregato condizionano il comportamento meccanico dell'aggregato.
- indice dei vuoti: è il rapporto tra il volume dei vuoti e il volume a secco. È un parametro decisamente più significativo di quello precedente.

Le proprietà meccaniche sono:

- costipamento: procedimento con il quale il terreno viene addensato per garantire una migliore resistenza meccanica.
- consolidazione: prova eseguita su terre limose/argillose.
- susceptività all'acqua: fornisce il grado di sensibilità all'acqua. Tutto ciò si studia tramite i limiti di Atterberg: il limite liquido w_l e il limite plastico w_p ed entrambi definiscono il contenuto in acqua per il quale essi si verificano.

3.6. REQUISITI DI ACCETTAZIONE IN LABORATORIO

- spigolosità e angolarità: permette di conferire resistenza alla miscela. Se poi tale proprietà è garantita anche sulla superficie carrabile allora permette di attribuire aderenza;
- indice di forma: in una miscela l'aggregato deve essere il più possibile compatto, poliedrico e non allungato altrimenti potrebbe rompersi sotto carico o dare luogo a scorrimento e quindi a deformazioni eccessive;
- resistenza alla frantumazione: l'aggregato non deve rompersi sotto carico. Tale proprietà quindi riguarda le proprietà meccaniche dell'aggregato e quindi resistenza alla frammentazione, all'abrasione e allo schiacciamento;
- resistenza al consumo per attrito (abradibilità): l'aggregato deve avere una certa resistenza all'usura indotta dalla continua levigazione dei pneumatici. In questo caso è importante la resistenza della microtessitura della superficie carrabile;

-equivalente in sabbia: il materiale lapideo non deve presentare sostanze organiche o eventuali polveri che ne impediscono l'adesione col legante;

-sensibilità al gelo: l'inerte non deve presentare porosità altrimenti numerose sono le possibilità di rottura alle basse temperatura sotto carico.

3.7. NORME PER LO STUDIO DEGLI AGGREGATI

Di seguito vengono elencate le varie prove che vengono eseguite sugli aggregati che, generalmente, sia prove CNR sia prove UNI forniscono procedure per l'esecuzione delle prove ma non i valori limite. Le norme a cui si è fatto riferimento sono:

- CNR 23 per l'analisi granulometrica di una terra;
- CNR 27 per la misura dell'equivalente in sabbia;
- CNR 62 per la massa volumica apparente non addensata;
- CNR 63 per la massa volumica apparente;
- CNR 64 per la massa volumica reale;
- CNR 95 per l'indice di forma e l'indice di appiattimento;
- UNI EN 1097-2 per la resistenza alla frammentazione (Los Angeles);
- CNR UNI 10014 per i limiti di Atterberg.

3.7.1. NORMA CNR 23

ANALISI GRANULOMETRICA DI UNA TERRA MEDIANTE CRIVELLI E SETACCI

1- *Definizione*

L'analisi granulometrica di una terra è l'insieme delle operazioni occorrenti per determinare la distribuzione percentuale in peso dei grani secondo le loro dimensioni. La determinazione viene eseguita mediante crivelli e setacci fino alla dimensione di mm 0.075. La distribuzione viene graficamente rappresentata mediante la curva granulometrica.

2- *Apparecchiatura di prova*

2.1- Una serie di crivelli UNI 2234 aventi le seguenti aperture in mm:

100-71-60-40-25-15-10-5

completi di coperchio e di fondo di raccolta. Si raccomanda che questi crivelli abbiano diametro non inferiore a 30cm.

2.2- Una serie di setacci UNI 2332 aventi le seguenti aperture in mm:

2-1-0.425-0.18-0.075

completi di coperchio e di fondo di raccolta.

2.3- Una bilancia avente portata di circa 10kg e sensibilità di 1g.

2.4- Una stufa per essiccare il materiale a 105-110°C.

2.5- Un essiccatore per contenere il materiale estratto dalla stufa durante il raffreddamento prima di iniziare la vagliatura.

3- *Preparazione dei provini*

3.1- Dal campione di terra prelevato ed inviato in laboratorio si devono ricavare, mediante quartature, provini aventi peso, una volta essiccati, circa eguale a quello indicato nella tabella, in relazione alla dimensione massima dei grani presenti:

Dimensione max. del grano [mm]	Peso approssimativo del provino [kg]
100	35
71	25
60	15
40	10
25	5
15	2
10	1
5	0.5
2	0.2

3.2- Il provino viene essiccato fino a peso costante alla temperatura di 105-110°C e lasciato raffreddare in essiccatore fino alla temperatura ambiente. La frazione di materiale superiore a

25mm, purch  priva di materiale fino aderente ai granuli o di grumi di materiale fino, pu  essere essiccata e raffreddata in altra maniera (corrente aria calda, ambiente asciutto ecc).

3.3- Il materiale essiccato, se presenta una apprezzabile frazione limo-argillosa, viene sottoposto alla analisi granulometrica per via umida, ossia previo lavaggio, diversamente si proceder  per via secca.

4- *Analisi granulometrica a secco*

L'analisi viene effettuata mediante crivelli fino all'apertura di 5mm compresa (crivellatura); mediante setacci al di sotto di 5mm (setacciatura).

4.1- *Esecuzione della prova*

4.1.1- Il materiale, dopo essere stato rimosso dall'essiccatore, viene preventivamente pesato; sia P_T . Si dispongono quindi i crivelli indicati al punto 2.1 in colonna sul fondo di raccolta con i diametri di apertura crescenti dal basso verso l'alto, si versa il materiale sul crivello superiore della colonna, si provvede a coprirlo e si d  inizio alla crivellatura.

4.1.2- L'operazione della crivellatura pu  essere effettuata mediante apparecchio meccanico, oppure a mano, imprimendo ai crivelli un movimento tale che il materiale sia portato a muoversi su tutta la superficie dei crivelli stessi. Ci si pu  accertare che l'operazione   finita separando i singoli crivelli della serie e continuando la crivellatura del materiale trattenuto su ognuno al di sopra di un foglio di carta per la durata di 30 secondi; non vi dovr  pi  essere una quantit  apprezzabile di passante.

4.1.3- Terminata la crivellatura si pesa il materiale raccolto nel fondo che rappresenta il materiale passante al crivello di 5mm di apertura e lo si indica con P_5 . A questo peso si aggiunge il peso del materiale trattenuto sul crivello da 5mm: l'insieme rappresenta cumulativamente il peso del passante al crivello da 10mm e lo si indica con P_{10} . Aggiungendo successivamente i pesi dei materiali trattenuti su ciascun crivello, procedendo verso l'alto, si ottengono i pesi dei passanti ai vari crivelli della serie. Nell'effettuare le pesate si dovr  avere cura di tenere separato il materiale raccolto nel fondo da quello trattenuto sui vari crivelli, dovendo il primo essere sottoposto a successiva setacciatura.

4.1.4- Si procede quindi alla setacciatura del materiale passante al crivello da 5mm. Se esso   in quantit  tale da non sovraccaricare i setacci, si opera su tutto il quantitativo, altrimenti si eseguono successive riduzioni fino ad ottenere un quantitativo di circa 500g. Si indica con R il rapporto fra il peso P_5 di tutto il passante al crivello da 5mm ed il peso q_5 del materiale ridotto. Sul quantitativo q_5 si eseguono le stesse operazioni descritte ai punti 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3, con la sola differenza che si impiega la serie dei setacci descritta al punto 2.2 anzich  la serie dei crivelli. Ad operazione ultimata si conoscono i pesi $q_2, q_1, q_{0.4}, q_{0.18}, q_{0.075}$ della porzione di

materiale proveniente dalla riduzione del passante al crivello da 5mm. Moltiplicando questi pesi per R si otterranno i pesi di materiale passante al $P_{2..P_{0,075}}$ relativi all'intero provino di terra.

4.2- *Elaborazione dei risultati*

4.2.1- Tutte le pesate effettuate vengono annotate e riportate su apposito modulo.

4.2.2- Le percentuali di passate ai singoli crivelli o setacci si ottengono come rapporto fra il peso del passante ed il peso P_T del provino, tenendo conto, come indicato al punto 4.1.4, dell'eventuale operazione di riduzione effettuata.

4.2.3- I risultati possono essere riportati o sotto forma tabulare o sotto forma di diagramma. Nel diagramma sono riportate in ordinate, in scala aritmetica, le percentuali di passante o di trattenuto. In ascisse, in scala logaritmica, le aperture dei crivelli e dei setacci.

5- *Analisi granulometrica per via umida*

L'analisi viene effettuata mediante crivelli fino all'apertura di 5mm compresa (crivellatura), mediante setacci al di sotto di 5mm (setacciatura).

5.1- *Esecuzione del prelavaggio*

Il materiale, preventivamente viene essiccato e pesato, viene immerso in acqua il tempo necessario perché avvenga il completo distacco della frazione fine dei granuli più grossi e la completa disgregazione dei grumi, favorendo l'operazione mediante agitazione.

Si versa quindi il tutto su una pila di due o tre setacci disposti nel seguente ordine successivo dall'alto: setaccio da 2mm, da 0,4mm, da 0,075mm, provvedendo a favorire il passaggio del materiale con getti di acqua e con l'azione di un pennello molto morbido fino a che le acque di lavaggio escano limpide. Il materiale trattenuto sui setacci verrà posto in stufa, essiccato fino a peso costante alla temperatura di 105-110°C, lasciato raffreddare in essiccatore fino alla temperatura ambiente e pesato, sia P_L il suo peso. Quindi sul materiale raccolto verrà eseguita l'analisi granulometrica a secco descritta al paragrafo 4.

5.2- *Elaborazione risultati*

5.2.1- Tutte le pesate effettuate vengono annotate e riportate su apposito modulo.

5.2.2- Il passate al setaccio da 0,075mm viene ricavato come differenza fra il peso totale iniziale P_T del materiale prima del lavaggio ed il peso P_L , dopo il lavaggio:

$$P_{0,075} = P_T - P_L \quad (3.1)$$

5.2.3.- Le percentuali di passante ai singoli crivelli e setacci si ottengono in modo analogo a quanto indicato al paragrafo 4.2.2., a proposito dell'analisi granulometrica a secco, avendo l'avvertenza di sommare ogni volta il peso del passante al setaccio 0,075mm in corrispondenza del lavaggio.

3.7.2. NORMA CNR 27

METODO DI PROVA PER LA MISURA DELL'EQUIVALENTE IN SABBIA

1- *Definizione*

L'equivalente in sabbia (E.S.) è un indice per caratterizzare convenzionalmente la presenza della frazione limo-argillosa di una terra.

2- *Apparecchiatura di prova*

2.1- Una provetta cilindrica trasparente graduata a fondo piano avente un diametro interno di 23mm ed un'altezza di 430 mm con un tappo in gomma. La gradazione deve essere fatta per un quinto di cm a partire dal fondo e devono essere tracciati due cerchi completi di riferimento all'altezza di cm 10 e cm 38. È opportuno che la provetta sia di materiale plastico trasparente. Qualora si vogliono eseguire più prove contemporaneamente è conveniente disporre di più provette.

2.2- Un tubo di lavaggio, in ottone o rame, di diametro esterno di 6,4 mm, lungo circa 500 mm, di cui una estremità è chiusa a forma di cuneo. Su ciascuna delle due superfici del cuneo è eseguito, in prossimità della punta, un foro del diametro di mm1.

2.3- Un boccione di vetro, munito di tappo, dalla capacità di circa 4 litri con un segno di riferimento al volume di 3785 cm³. Serve per contenere la soluzione lavante a va disposto a 92 cm sopra il piano di lavoro. Il boccione deve essere munito di un sistema a sifone oppure essere provvisto inferiormente di un rubinetto. Viene collegato al tubo di lavaggio, di cui al punto 2.2, per mezzo di un tubo di gomma dotato di una pinza di Mohr. Il sistema a sifone è costituito da un tappo con due fori, entro uno dei quali passa un tubo che pesca nel fondo del boccione ed è curvato in sommità per innestarsi al tubo in gomma. Entro il secondo foro del tappo è disposto un altro tubo, sporgente di poco sopra e sotto il tappo stesso, per mezzo del quale si può innescare il sifone.

2.4- Un pistone in ottone costituito da un'asta di mm 460 di lunghezza e di mm6 di diametro, terminante con una base cilindrico - conica. La porzione cilindrica inferiore della base ha un diametro di mm 25,4 ed un'altezza di mm 5. Radialmente sulla sua superficie laterale sono fissate tre piccole viti di ottone a testa tonda, rognabili in modo da poter centrare il pistone nella provetta cilindrica lasciando solo un piccolo gioco. L'altezza totale della base è di mm 19. Sull'estremità superiore dell'asta è avvitato un peso di forma cilindrica di entità tale che tutto il complesso venga a pesare 1 kg ± 5 g.

2.5- Un coperchio di ottone di misura tale da adattarsi alla provetta cilindrica, provvisto di un foro centrale in cui scorre l'asta del pistone, del quale permette il centraggio nella parte superiore della provetta stessa.

2.6- Un contenitore della capacità totale, a raso, di 88cm^2 ed una spatola a lama piana per rificare a raso orlo la terra versata nel contenitore.

2.7- Un imbuto ad apertura larga per versare la terra dal contenitore anzidetto nella provetta cilindrica.

2.8- Un setaccio n.4 A.S.T.M. (4,76mm di apertura)

2.9- Un apparecchio per l'agitazione meccanica della provetta, munito di dispositivo per la misura del numero e della frequenza dei colpi. L'apparecchio serve ad imprimere alla provetta un movimento orizzontale alternativo secondo il suo asse, con una corsa di 20 cm.

2.10- Un contasecondi o un orologio.

3- *Soluzione di prova*

3.1- Una soluzione concentrata di riserva, la cui dosatura per litro è: 120 g di cloruro di calcio tecnico anidro, 542 g di glicerina, 12,4 g di soluzione di formaldeide al 40 % in volume. Si fa sciogliere il cloruro di calcio in 500 cm^3 di acqua distillata mescolando. Si lascia raffreddare e riposare per un certo tempo la soluzione, indi la si filtra attraverso carta da filtro Whatman n.12 o equivalente. Si aggiunge poi la glicerina e la formaldeide mescolando con cura ed infine si aggiunge acqua distillata fino ad un volume complessivo di 1000 cm^3 .

3.2- Una soluzione di lavoro, ottenuta da quella di riserva diluendo 88 cm^3 (volume del contenitore di cui al 2.6) con acqua distillata fino ad un volume totale di 3785 cm^3 .

4- *Preparazione del materiale*

La prova dell'E.S. viene eseguita sulla frazione di un materiale passante al setaccio n.4 A.S.T.M. È buona norma che il materiale da trattare venga mantenuto leggermente umido durante l'operazione di setacciatura per evitarne l'eventuale perdita di una porzione delle parti più fini. La frazione trattenuta al setaccio verrà scartata; può però succedere che il materiale fine resti ad essa aderente o formi dei grumi non passanti. In questo caso bisognerà innanzitutto disgregare i grumi e si dovrà quindi provvedere all'essiccazione degli elementi grossi ricoperti di materiale aderente, dopo di che si potrà agevolmente separare la parte fine per strofinamento con le dita ed aggiungere anch'essa al materiale già preparato. Il materiale così ottenuto va poi essiccato a $100-105^\circ\text{C}$.

5- *Esecuzione della prova*

5.1- Si versa nella provetta cilindrica, per mezzo del tubo di lavaggio, la soluzione di lavoro, fino a giungere al primo cerchio di riferimento (10 cm).

5.2- Si riempie il contenitore di cui in 2.6 col materiale in esame, pareggiandolo al bordo con l'apposita spatola. Compiendo questa operazione si avrà cura di non comprimere il materiale e di non assoggettare il contenitore a bruschi movimenti, onde evitare l'assestamento del materiale stesso.

5.3- Si versa il contenuto nella provetta servendosi dell'imbuto ad apertura larga. Si tappa e si batte energicamente il fondo della provetta sul palmo della mano a più riprese per facilitare l'umidificazione del campione e l'eliminazione di bolle d'aria. Si lascia quindi riposare per circa 10 minuti.

5.4- Si assoggetta la provetta ad una agitazione in senso orizzontale per mezzo dell'agitatore meccanico (figura laterale). L'agitazione consiste in 90 cicli effettuati in 30 secondi, con una corsa di cm 20 (per ciclo si intende un movimento completo di andata e ritorno).



Figura 3.2. Strumento per l'agitazione delle provette

5.5- Posata la provetta sul piano di lavoro, si toglie il tappo e si introduce il tubo di lavaggio. Facendo scendere il tubo, si risciacqua rapidamente con la soluzione di lavoro la parte interna della provetta. Arrivati al fondo, si continua a dare al tubo un leggero movimento su e in giù, facendo girare lentamente coll'altra mano la provetta. In tal modo viene lavata la sabbia separando le parti fini che salgono verso l'alto.

Allorché il livello del liquido è prossimo al circolo di riferimento superiore (38cm), si estrae il tubo dal liquido stesso e se ne arresta l'afflusso solo quando esso ha raggiunto esattamente il livello del suddetto circolo.

5.6- Da questo istante si lascia riposare la provetta per un periodo di 20 minuti esatti (a lato), avendo cura che nel frattempo la provetta non subisca la benché minima vibrazione o movimento.

5.7- Alla fine dei 20 minuti si legge e si annota il livello h_1 della sospensione.

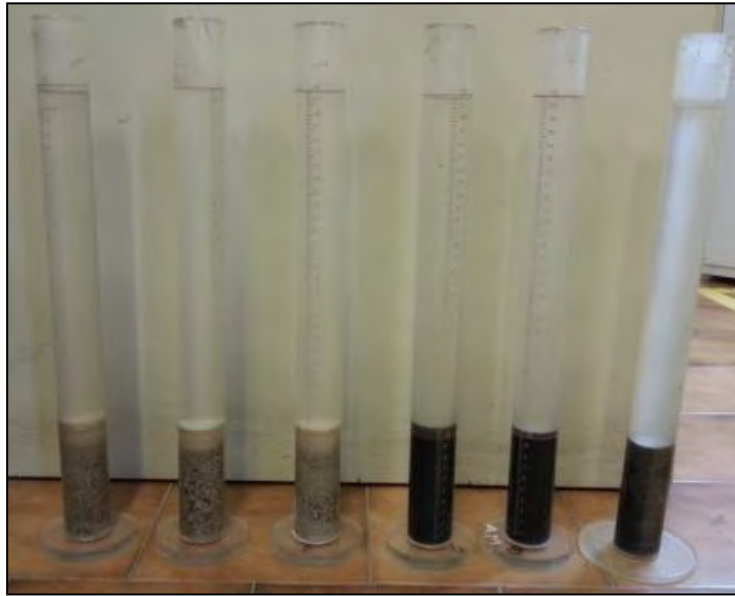


Figura 3.0.2. Provette dopo 20 minuti di riposo

5.8- Si introduce il pistone nella provetta e lo si fa scendere lentamente fino a che la sua superficie inferiore appoggi sulla sabbia. Durante la discesa del pistone si deve avere l'avvertenza di portare una delle viti centranti a contatto della parte della provetta in corrispondenza della scala graduata. Allorché il pistone si è arrestato, si legge e si annota il livello h_2 al centro della vite. L'altezza così rilevata viene assunta quale spessore dello strato di sabbia.

6- *Elaborazione dei risultati*

6.1- Il valore dell'equivalente in sabbia di una terra è dato da:

$$E.S. = 100 \cdot \frac{h_2}{h_1} \quad (3.2)$$

ove h_1 è l'altezza della sospensione ed h_2 lo spessore dello strato di sabbia. Si fornirà il valore E.S. con un numero intero, arrotondando il risultato ottenuto al numero intero immediatamente superiore.

6.2- È buona norma ricavare il valore dell'E.S. come media di tre prove.

7- *Precauzione da prendersi*

7.1- I dure fori situati all'estremità inferiore del tubo di lavaggio possono venire ostruiti da qualche particella di sabbia. In questo caso occorrerà rimuovere l'ostruzione avendo cura di evitare l'allargamento dei fori stessi.

7.2- All'interno del boccione e nel tubo di lavaggio, può occasionalmente manifestarsi la crescita di un fungo che si presenta come una sostanza viscida nella soluzione. Questo fungo può essere rimosso facilmente mediante lavaggio con una soluzione di ipoclorito di sodio diluito con una

uguale quantità di acqua, avendo l'avvertenza di lasciare il boccione ed il tubo di lavaggio pieni della soluzione suddetta per una notte.

3.7.3. NORMA CNR 62

DETERMINAZIONE DELLA MASSA VOLUMICA APPARENTE DI AGGREGATI NON ADDENSATI.

1- *Definizione*

Massa volumica apparente di un aggregato non addensato è la massa di un volume unitario del materiale, inclusi i vuoti intergranulari e i pori.

2- *Apparecchiature*

2.1- Recipienti cilindrici metallici indeformabili, con diametro pari all'altezza e di volume noto, in funzione della dimensione massima degli aggregati, scelto secondo la seguente tabella:

Dimensioni max del granulo mm	Capacità min. del recipiente dm ³
10	2,0
40	10,0
71	20,0

2.2- Bilancia con sensibilità non inferiore allo 0,5% della massa del campione in esame.

2.3- Stufa per l'essiccazione a 110° ±5°C con termostato dalla sensibilità di 5°C.

3- *Esecuzione della prova*

3.1- Il materiale tutto passante al crivello 71 UNI va essiccato a 110° ±5°C fino alla massa costante.

3.2- Il recipiente viene riempito completamente, fino a far traboccare il materiale, con una sessola. Il materiale viene livellato a raso orlo curando che non avvengano assestamenti.

3.3- Il materiale contenuto nel cilindro viene pesato con l'approssimazione dello 0,5% della sua massa.

3.4- L'operazione va ripetuta tre volte e i risultati mediati.



Figura 3.4. Fustelle per le masse volumiche

4- *Elaborazione dei risultati*

Sia m la massa determinata al punto 3.4 e v il volume del recipiente, la massa volumica degli aggregati espressa in grammi al centimetro cubo è data da

$$\gamma = \frac{m}{v} \quad (3.3)$$

Il risultato deve essere arrotondato alla seconda cifra decimale.

3.7.4. NORMA CNR 63

DETERMINAZIONE DELLA MASSA VOLUMICA APPARENTE DEI GRANULI DI UN AGGREGATO

1- *Definizione*

La massa volumica apparente dei granuli di un aggregato è la massa di un volume unitario del materiale solido, inclusi i pori interni ai granuli non saturabili con acqua.

2- *Apparecchiatura*

- 2.1- Bilancia con sensibilità non inferiore a 0,5 % della massa del campione in esame.
- 2.2- Stufa termostatica per l'essiccazione del materiale a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- 2.3- Bilancia idrostatica con sensibilità non inferiore a 0,5 % della massa del campione in esame.
- 2.4- Serie di picnometri aventi un volume non inferiore a circa 3 volte il volume dell'aggregato.
- 2.5- Un termometro con scala da 0° a 100°C con sensibilità non minore di $0,5^{\circ}\text{C}$.
- 2.6- Crivelli da 10, 25, 40, 71 mm (serie UNI 2334° setacci equivalenti).
- 2.7- Cestelli cilindrici con maglie e fori di circa 5 mm di apertura aventi diametro ed altezza commisurati alla quantità di materiale da pesare.
- 2.8- Recipiente per la pesata idrostatica di capacità idonea a contenere sommerso il cestello di cui al punto 2.7.

2.9_ Essiccatore

3- *Metodi di prova*

La determinazione della massa volumica apparente va eseguita in modo diverso secondo i seguenti casi:

- a) Materiali totalmente passanti al crivello da 10 mm;
- b) Materiali totalmente trattenuti al crivello da 10 mm;
- c) Materiali parzialmente passanti al crivello da 10 mm.

È pertanto necessario procedere preliminarmente alla vagliatura sul crivello da 10 mm.

4- *Materiali totalmente passanti al crivello da 10 mm (metodo del picnometro)*

4.1- Preparazione del provino

Da un campione rappresentativo dell'aggregato si prelevano, attraverso riduzione, circa 500 g di materiale. Il materiale viene essiccato in stufa a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e lasciato raffreddare in essiccatore. Si ripete l'operazione fino a massa costante.

4.2 Esecuzione della prova

4.2.1- Il materiale così preparato viene pesato con precisione di 0,1 g ed introdotto nel picnometro.

4.2.2- Si versa nel picnometro acqua distillata in quantità tale da sommergere il materiale e riempire il picnometro stesso per circa metà. Si lascia il materiale nell'acqua per almeno 4 ore.

4.2.3- Si estrae l'aria contenuta nell'acqua e fra i granuli dell'aggregato con uno dei seguenti procedimenti:

4.2.3.1- Si sottopone il contenuto del picnometro per almeno 20 minuti ad un vuoto parziale, corrispondente ad una pressione dell'aria non maggiore di 13,33 kPa (100 mm Hg), avendo cura di agitare frequentemente il recipiente.

4.2.3.2- Si fa bollire con cautela il contenuto del picnometro per almeno 20 minuti, avendo cura di agitare continuamente il recipiente. Dopo l'ebollizione si lascia raffreddare il picnometro a temperatura ambiente per non meno di 6 ore.

4.2.4- Si versa nel picnometro acqua distillata disaerata di recente ed a temperatura ambiente fino a raggiungere, con la superficie inferiore del menisco, la linea di fede del picnometro, e si asciuga accuratamente la parte interna superiore alla linea di fede e tutta la superficie esterna del picnometro.



Figura 3.5. Picnometro

Si pesa quindi il picnometro e, subito dopo la pesata, si inserisce il bulbo del termometro al centro del recipiente e si legge con precisione di $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ la temperatura t .

4.2.5- Si vuota il picnometro e lo si riempie come indicato nel punto 4.2.4 con sola acqua distillata disaereata di recente e che si trovi alla stessa temperatura t letta precedentemente e lo si pesa. Questa operazione può essere sostituita, una volta per tutte, dalla curva di taratura del picnometro.

4.3- Elaborazione dei risultati

4.3.1- La massa volumica apparente γ_g dei granuli dell'aggregato, espressa in grammi al centimetro cubo, è data da:

$$\gamma_g = \frac{P}{p - p_2 + p_1} \cdot \gamma_w \quad (3.4)$$

Dove:

p è la massa dell'aggregato essiccato contenuto nel picnometro (vedere punto 4.2.1);

p_1 è la massa, alla temperatura t , del picnometro riempito di sola acqua distillata (vedere punto 4.2.5);

p_2 è la massa, alla temperatura t , del picnometro riempito di aggregato e di acqua distillata (vedere 4.2.4);

γ_w è la massa volumica dell'acqua distillata e disaerata alla temperatura t .

4.3.2- Il risultato deve essere arrotondato alla seconda cifra decimale.

5- *Materiali totalmente trattenuti al crivello da 10 mm (metodo della bilancia idrostatica)*

5.1- Preparazione del provino

Da un campione rappresentativo si prelevano attraverso riduzione non meno di:

2 kg di materiale per dimensioni fino a 25 mm;

5 kg di materiale per dimensioni fino a 40 mm;

10 kg di materiale per dimensioni fino a 71 mm.

5.2- Esecuzione della prova

5.2.1- Il materiale così prelevato viene lavato sul crivello da 10 mm e posto in uno dei cestelli di cui al punto 2.7.

5.2.2- Si introduce il cestello nel recipiente di cui al punto 2.8 e si riempie questo con acqua distillata, fino a coprire completamente materiale e cestello per circa 2 cm.

5.2.3- Si estrae l'aria contenuta nell'acqua e fra i granuli dell'aggregato lasciando il materiale in acqua per almeno 4 ore e avendo cura di rimuoverlo frequentemente finché non si noti la scomparsa di bollicine d'aria.



Figura 3.6. Bilancia col provino immerso nel recipiente

5.2.4- Si pesa il cestello con il materiale in esso contenuto immerso in acqua (foto a lato). Subito dopo si estrae il cestello dal recipiente, si inserisce il bulbo del termometro nell'acqua e si legge con precisione di $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ la temperatura t .

5.2.5- Si vuota il cestello e lo si pesa in acqua con le stesse modalità indicate nel punto 5.2.2.

5.2.6- Il materiale contenuto nel cestello viene essiccato in stufa a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$, lasciato raffreddare e quindi pesato dopo aver raggiunto massa costante.

5.3- Elaborazione dei risultati

La massa volumica apparente dei granuli, espressa in grammi al centimetro cubo, è data da

$$\gamma_g = \frac{p_3}{p_3 - p_4 + p_5} \cdot \gamma_w \quad (3.5)$$

Dove:

p_3 è la massa dell'aggregato posto nel cestello ed essiccato (vedere punto 5.2.6);

p_4 è la massa dell'aggregato e del cestello immersi in acqua alla temperatura t (vedere punto 5.2.4);

p_5 è la massa del cestello immerso in acqua alla temperatura t (vedere punto 5.2.5);

γ_w è la massa volumica dell'acqua distillata alla temperatura t .

5.3.2- Il risultato deve essere arrotondato alla seconda cifra decimale.

6- *Materiali parzialmente passanti al crivello da 10 mm*

6.1- Preparazione del provino

Da un campione rappresentativo dell'aggregato si prelevano, attraverso riduzione, da 2 a 10 Kg di materiale, come indicato al punto 5.1.

Si effettua la separazione delle due frazioni sul crivello da 10 mm come indicato nel punto 3, e dopo la loro essiccazione a massa costante se ne determinano le percentuali in massa.

6.2- Esecuzione della prova

Per la frazione passante al crivello da 10 mm si opera come indicato nel punto 4.

Per la frazione trattenuta al crivello da 10 mm si opera come indicato al punto 5.

Le due determinazioni devono essere eseguite o riportate alla stessa temperatura.

6.3- Elaborazione dei risultati

6.3.1- La massa volumica γ_g dei granuli dell'aggregato, espressa in grammi al centimetro cubo, è data da:

$$\gamma_g = \frac{N_a \cdot \gamma_{ga} + N_b \cdot \gamma_{gb}}{100} \cdot \gamma_w \quad (3.6)$$

Dove:

N_a e N_b sono le percentuali in massa rispettivamente della frazione passante e di quella trattenuta al crivello da 10 mm;

γ_{ga} e γ_{gb} sono le masse volumiche dei granuli delle frazioni di cui sopra.

6.3.2- Il risultato deve essere arrotondato alla seconda cifra decimale ed è opportuno che sia accompagnato sia dal valore delle percentuali in massa, sia dalla massa volumica apparente dei granuli delle frazioni passante e trattenuta al crivello da 10 mm.

3.7.5. NORMA CNR 64

DETERMINAZIONE DELLA MASSA VOLUMICA REALE DEI GRANULI DI UN AGGREGATO

1- *Definizione*

La massa volumica reale dei granuli di un aggregato è la massa di un volume unitario del materiale solido, esclusi i pori esistenti all'interno dei granuli.

2- *Apparecchiatura di prova*

2.1- Un picnometro di vetro avente una capacità compresa tra i 100 e 500 cm³.

2.2- Una bilancia con sensibilità non minore di 0,01g.

2.3- un termometro con sensibilità non minore di 0,5°C.

2.4- Una stufa termostatica per l'essiccazione de materiale a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

3- *Preparazione del provino*

Un campione rappresentativo di circa 2 kg per aggregati con dimensioni superiori a 25mm e di 1kg di dimensioni inferiori di 25mm, viene frantumato e quindi polverizzato mediante un mulino. Il materiale viene quindi passato al setaccio 0,2 UNI, il trattenuto a tale setaccio va eliminato, il passante viene essiccato in stufa a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e lasciato raffreddare in essiccatore. L'operazione va ripetuta fino a massa costante.



Figura 3.7. Mulino

4- *Esecuzione della prova*

4.1- Da 20 a 50g di materiale così preparato vengono prelevati mediante riduzione, pesati e introdotti nel picnometro.

4.2- Si versa nel picnometro acqua distillata in quantità tale da riempire il picnometro stesso per circa metà, lasciando il materiale in acqua per almeno 4 ore.

4.3- Si estrae l'aria contenuta nell'acqua con uno dei seguenti procedimenti:

4.3.1- Si sottopone il contenuto del picnometro per non meno di 20 min, ad un vuoto parziale corrispondente ad una pressione dell'aria non maggiore di 13,33 KPs, avendo cura di agitare frequentemente il picnometro.

4.3.2- Si fa bollire lievemente il contenuto del picnometro per non meno di 20min agitando frequentemente. Dopo l'ebollizione si lascia raffreddare a temperatura ambiente. Dopo l'ebollizione si lascia raffreddare a temperatura ambiente.

4.4- Si versa nel picnometro altra acqua distillata disaerata di recente ad a temperatura ambiente fino a raggiungere, con la superficie inferiore del menisco, la linea di fede del picnometro, e si asciuga accuratamente la parte interna superiore alla linea di fede e tutta la superficie esterna del picnometro. Si pesa quindi il picnometro e, subito dopo la pesata, si inserisce il bulbo del termometro al centro del picnometro e si legge con precisione di $\pm 5^\circ\text{C}$ la temperatura t .

4.5- Si vuota il picnometro e lo si riempie come indicato al punto 4.4 con sola acqua distillata disaerata di recente e che si trovi alla stessa temperatura t letta precedentemente e lo si pesa. Questa operazione può essere sostituita, una volta per tutte, dalla curva di taratura del picnometro.

5- *Elaborazione dei risultati*

5.1- La massa volumica reale γ_r , espressa in grammi al centimetro cubo, è data da:

$$\gamma_r = \frac{p}{p + p_2 - p_1} \cdot \gamma_w \quad (3.7)$$

dove:

p massa del materiale essiccato contenuto nel picnometro (punto 4.1)

p_2 massa alla temperatura t , del picnometro ripieno di sola acqua distillata (4.5)

p_1 massa alla temperatura t , del picnometro riempito di materiale e acqua distillata (4.4)

γ_w massa dell'acqua distillata e disaerata alla temperatura t .

5.2- Il risultato deve essere arrotondato alla seconda cifra decimale. Va indicata la temperatura di prova.

3.7.6. NORMA CNR 95

FORMA DI AGGREGATI LAPIDEI

A- Definizioni

A.1- Dimensioni

Le dimensioni di un elemento lapideo, facente parte di un aggregato, sono caratterizzate dalle seguenti grandezze, convenzionalmente definite come segue:

- Lunghezza L, eguale alla massima distanza fra due piani paralleli tangenti all'elemento;
- Spessore S, eguale alla minima distanza fra due piani paralleli tangenti all'elemento;
- Larghezza D, spesso indicata come diametro, eguale alla minima apertura del setaccio (a maglie quadrate) attraverso cui l'elemento passa.

A2- Forma di un elemento

Ai fini della presente Norma si assume che la forma di un singolo elemento lapideo sia individuata dai seguenti rapporti:

coefficiente di forma $C_f=L/S$;

coefficiente di appiattimento $C_a=D/S$;

coefficiente di allungamento $C_l=L/D$.

Poiché $C_l= C_f/C_a$.

Si assume che l'elemento abbia forma non idonea (eccessivamente allungata o appiattita) quando sia:

$C_f \geq 3$ e/o $C_a \geq 1.58$

A3- Indici di forma per un aggregato:

Per un insieme di elementi, o grani, costituente un aggregato, si definiscono i corrispondenti: Indice di forma I_f e Indice di appiattimento I_a del campione, sulla base della quantità percentuale in massa di elementi di forma non idonea, operando secondo la presente Norma.

B- Determinazione dell'indice di forma

B1- Principio del metodo di prova

Il metodo di prova consiste nello stabilire, su un provino costituito da una quantità sufficiente di elementi lapidei da essere rappresentativo del campione, l'indice di forma I_f misurando manualmente la lunghezza L e lo spessore S di ciascun elemento mediante apposito calibro.

B2- Campo di applicabilità

La prova si effettua sul materiale trattenuto al setaccio da 4 mm e passante al setaccio da 63 mm.

B3- Apparecchiatura

B3-1 Calibro doppio scorrevole costruito in modo che il rapporto fra l'apertura L del calibro principale e la corrispondente apertura S del calibro secondario sia eguale a 3.

B3-2 Bilancia tecnica di portata compatibile con le pesate di cui al punto B4 e sensibilità non inferiore allo 0,1% della massa pesata.

B3-3 Stufa con regolazione termostatica della temperatura a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

B3-4 Setacci con apertura di 63 e di 4 mm.

B4- Preparazione del provino

B4-1 Il campione di aggregato, prelevato ed inviato in laboratorio, va vagliato al setaccio da 4v mm ed il passante scartato.

B4-2 Dal materiale così ottenuto si ricava, mediante successive riduzioni, un campione di prova avente massa M in grammi data da:

$M \geq 200$ Dmax per $D_{\text{max}} \leq 20$ mm

$M \geq 600$ Dmax per $D_{\text{max}} > 20$ mm

In cui Dmax è il diametro massimo in mm dei grani presenti.

B4-3 Il provino sarà costituito da non meno di 100 elementi prelevati a caso dopo accurato mescolamento del materiale di cui al punto B4-2.

B5- Esecuzione della prova

B5-1 Essiccare il provino a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ fino a massa costante e pesare: sia M_0 la sua massa.

B5-2 Di ciascun elemento si misura la lunghezza L fra le ganasce del calibro principale, quindi l'elemento viene presentato fra le ganasce del calibro secondario secondo il suo spessore S. Tutti gli elementi che passano a tale calibro vengono pesati: sia M_1 la loro massa.

B6- Espressione dei risultati

L'indice di forma I_f è dato da:

$$\frac{M_1}{M_0} \times 100 \quad (3.8)$$

In cui:

M_1 = massa degli elementi passanti al calibro secondario.

M_0 = massa totale dei 100 o più elementi sottoposti a misura.

C- Determinazione dell'indice di appiattimento

C1- Principio del metodo di prova

Il metodo di prova consiste nel dividere il campione mediante una normale setacciatura in frazioni granulometriche diverse, comprese fra i setacci "d" e "D" con $D=1,25 D$ e nel setacciare il materiale di ciascuna frazione su un vaglio a fenditure parallele (griglia) avente un'apertura eguale a $d/1,58$.

C2- Campo di applicabilità

La prova si effettua sul materiale trattenuto al setaccio da 4 mm e passante al setaccio da 63 mm.

C3- Apparecchiatura

C3-1 Setacci con le seguenti aperture: 63, 50,40, 31,5, 25, 20, 16, 12,5, 10, 8, 6,3, 5, 4 mm.

C3-2 Vagli a fessure (griglie) con aperture di 31,7- 25,3- 20- 16- 12,5- 10- 8- 6,3- 5- 4- 3,15- 2,5 mm.

Per ogni vaglio le fessure devono soddisfare alle seguenti condizioni:

- a) Per non più del 10% della lunghezza totale di una fessura è ammesso uno scostamento massimo di 0,25 mm dell'apertura nominale.
- b) In nessun punto la larghezza della fessura può scostarsi di più di 0,5 mm dall'apertura nominale.

Il vaglio sarà costituito da barrette tonde di acciaio, parallele fra loro, fissate ad un telaio, sufficientemente rigide in modo che l'apertura fra le barre non subisca variazioni apprezzabili durante l'esecuzione della prova.

C4- Preparazione del provino

C4-1 Il campione di aggregato prelevato ed inviato in laboratorio, va vagliato al setaccio da 4 mm ed il passante scartato.

C4-2 Dal materiale così ottenuto si ricava, mediante successive riduzioni, un campione di prova avente massa M in grammi data da :

$M \geq 200 D_{max}$ per $D_{max} \leq 20$ mm

$M \geq 600 D_{max}$ per $D_{max} > 20$ mm

In cui D_{max} è il diametro massimo in mm dei grani presenti.

C4-3 Il campione di prova viene quindi essiccato a massa costante alla temperatura di $110^{\circ} \pm 5^{\circ}C$ e pesato. Sia M_0 la massa del provino così ottenuto.

C5- Preparazione del provino

C5-1 Mediante setacciatura sui setacci indicati al punto C3-1 si divide il provino nelle frazioni granulometriche indicate nella tabella e si determina, con l'approssimazione del grammo, la massa M_f di ciascuna frazione.

C5-2 Si setaccia a mano il materiale di ciascuna frazione sulla griglia corrispondente avente l'apertura indicata nella tabella:

Frazione granulometrica d/D mm	Apertura griglia corrispondente mm
50-63	31,7
40-50	25,3
31,5-40	20
25-31,5	16
20-25	12,5
16-20	10
12,5-16	8
10-12,5	6,3
8-10	5
6,3-8	4
5-6,3	3,15
4-5	2,5

C5-3 Il passante alla griglia viene pesato con l'approssimazione del grammo; sia M_g tale massa.

C4- Espressione dei risultati

L'indice di appiattimento di ciascuna frazione granulometrica è dato da

$$\frac{M_g}{M_f} \times 100 \quad (3.9)$$

L'indice di appiattimento globale del provino è dato da:

$$I_a = \frac{\sum M_g}{\sum M_f} \times 100 \quad (3.10)$$

Dove:

M_g = massa di ciascuna frazione passante sulla griglia corrispondente

M_f = massa di ciascuna frazione granulometrica.

La sommatoria è estesa a tutte le frazioni prima indicate, presenti nel campione.

C7- Validità della prova

La prova è valida se differisce da M_0 di non più del 2%.

3.7.7. UNI EN 1097-2

METODI PER LA DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA ALLA FRAMMENTAZIONE

1- *Scopo e campo di applicazione*

La presente norma europea specifica i procedimenti per la determinazione della resistenza alla frammentazione degli aggregati grossi. Vengono definiti due metodi:

- a) La prova Los Angeles (metodo di riferimento);
- b) La prova d'urto (metodo alternativo).

La prova d'urto può essere utilizzata in alternativa alla prova Los Angeles ma dovrebbe essere stabilita una correlazione con la prova Los Angeles per evitare di effettuare una doppia prova e per garantire il reciproco riconoscimento dei risultati. In caso di controversia, dovrebbe essere utilizzata la prova Los Angeles (metodo di riferimento). La presente norma europea si applica agli aggregati naturali o artificiali impiegati nell'ingegneria edile e civile.

2- *Riferimento normativi*

Omissis

3- *Termini e definizioni*

Ai fini della presente norma, si applicano le definizioni seguenti:

- 3.1- coefficiente Los Angeles, LA: Percentuale del campione di prova passante attraverso uno staccio con luce di maglia di 1,6 mm a prova completata.
- 3.2- valore d'urto: Valore SZ che fornisce una misura della resistenza degli aggregati alla frantumazione dinamica. È pari a un quinto della somma delle percentuali della massa del campione passante attraverso 5 stacci di prova specificati quando sottoposto a prova conformemente al punto 6.
- 3.3- provino: Campione utilizzato durante una singola determinazione quando il metodo di prova richieda più di una determinazione per una proprietà.
- 3.4- campione di prova: Campione utilizzato nel suo insieme in una singola prova.
- 3.5- campione di laboratorio: Campione ridotto ottenuto da un campione globale per prove di laboratorio.
- 3.6- massa costante: Pesate successive effettuate dopo l'essiccamento ad almeno 1 h di intervallo l'una dall'altra, i cui valori non differiscano fra di loro di più dello 0,1%.

4- *Apparecchiatura*

4.1- Apparecchiatura generale

- 4.1.1- Stacci di prova, conformi alla EN 933-2

4.1.2- Bilancia, in grado di pesare il campione di prova con accuratezza dello 0,1% della massa del campione di prova.

4.1.3- Stufa ventilata, regolata per mantenere una temperatura di $(110 \pm 5^\circ\text{C})$.

4.2- Apparecchiature supplementari richieste per la determinazione della resistenza alla frammentazione mediante il metodo di prova Los Angeles.

4.2.1. Apparecchiatura che riduce il campione di laboratorio a un campione di prova.

4.2.2. Macchina di prova Los Angeles, comprendente le parti principali seguenti: 1) mensola, 2) rotazione, 3) coperchio e apertura.

4.2.2.1- Cilindro cavo, fabbricato con una lamiera di acciaio profilato dello spessore di mm conforme alla qualità S275 specificata dalla EN 10025:1993, scelta per essere formata senza sollecitazioni eccessive e che possa essere saldata senza deformazione significativa.

Il cilindro deve essere chiuso ad entrambe le estremità e avere diametro interno di (711 ± 5) mm e lunghezza interna di (508 ± 5) mm. Il cilindro deve poggiare su due assi scorrevoli orizzontali fissati alle sue due estremità che tuttavia non penetrino al suo interno e deve essere installato in modo tale da rotare attorno a un asse orizzontale. Per facilitare l'inserimento e la rimozione del campione dopo la prova, deve essere prevista un'apertura di larghezza di (150 ± 3) mm, che corra preferibilmente lungo l'intera lunghezza del cilindro. Durante la prova, l'apertura deve essere sigillata a tenuta di polvere utilizzando un coperchio amovibile che consenta alla superficie interna di preservare la sua forma cilindrica.

La superficie interna cilindrica deve essere interrotta da una mensola sporgente collocata ad una distanza compresa fra 380 mm e 820 mm dall'apertura più vicina. La distanza deve essere misurata lungo la parte interna del cilindro nel senso di rotazione.

La mensola deve avere sezione trasversale rettangolare [lunghezza equivalente a quella del cilindro, larghezza di (90 ± 2) mm, spessore di (25 ± 1) mm] ed essere collocata su un piano diametrale lungo una generatrice e fissata saldamente in posizione. La mensola deve essere sostituita quando la sua larghezza si riduce a meno di 86 mm in qualsiasi punto e il suo spessore si riduce a meno di 23 mm in qualsiasi punto del bordo anteriore.

La base della macchina deve poggiare direttamente su un pavimento piano di calcestruzzo o di pietra.



Figura 3.8. Cilindro per la Los Angeles

4.2.2.2- Una carica di sfere, composta da 11 sfere di acciaio aventi ciascuna diametro compreso fra 45 mm e 49 mm (vedere l'appendice A). Ciascuna sfera deve avere una massa compresa fra 400 g e 445 g, mentre la carica deve pesare in totale fra i 4 690 g e i 4 860 g. La massa nominale della carica composta da sfere nuove è 4 840 g. Una tolleranza di + 20 g consente di tenere conto delle variazioni dovute alla fabbricazione, mentre una tolleranza di - 150 g consente di tenere conto dell'usura delle sfere dovuta all'utilizzo.

4.2.2.3- Motore, che impartisce al cilindro una velocità di rotazione compresa fra 31 giri/min e 33 giri/min.

4.2.2.4- Vassoio, per recuperare il materiale e la carica di sfere dopo la prova.

4.2.2.5- Contagiri, che arresti automaticamente il motore dopo il numero di giri richiesto.

4.3- Apparecchiatura supplementare richiesta per la determinazione della resistenza alla frammentazione mediante il metodo della prova d'urto.

4.3.1- Dispositivo di misurazione d'urti.

4.3.2- Apparecchiatura per la prova dell'accuratezza del dispositivo di misurazione d'urti.

4.3.3- Spazzola e recipienti.

5- *Determinazione della resistenza alla frammentazione mediante il metodo di prova Los Angeles*

5.1- Principio: In un cilindro rotante viene fatto rotolare un campione di aggregato insieme alle sfere di acciaio. Completata la rotazione, viene determinata la quantità di materiale trattenuta da uno staccio con luce di maglia di 1,6 mm.

5.2- Preparazione del campione per la prova: La massa del campione inviato al laboratorio deve essere costituita da almeno 15 kg di particelle con granulometria compresa fra 10 mm e 14 mm.

La prova deve essere eseguita su un aggregato passante attraverso uno staccio di prova di 14 mm e trattenuto su uno staccio di prova di 10 mm.

Inoltre, la classificazione del campione di prova deve essere conforme a uno dei requisiti seguenti:

a) percentuale passante attraverso uno staccio di prova di 12,5 mm compresa fra 60% e 70%;
oppure

b) percentuale passante per uno staccio di prova di 11,2 mm compresa fra 30% e 40%. Vagliare allo staccio il campione di laboratorio mediante stacci da 10 mm, 11,2 mm (o 12,5 mm) e 14 mm per ottenere frazioni separate di granulometria compresa fra 10 mm e 11,2 mm (o 12,5 mm) e fra 11,2 mm (o 12,5 mm) e 14 mm. Lavare ciascuna frazione separatamente conformemente al punto 6 della EN 933-1:1997 ed essicarla nella stufa a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ fino a massa costante.

Lasciare raffreddare le frazioni a temperatura ambiente, quindi miscelare le due frazioni per ottenere un campione di laboratorio modificato di classe granulometrica (10 - 14) mm conforme al relativo requisito supplementare di classificazione sopraindicato.

Ridurre il campione di laboratorio modificato, preparato a partire dalle frazioni miscelate, alle dimensioni del campione di prova conformemente al prEN 932-2. La porzione di prova deve avere massa di (5000 ± 5) g.

5.3- Procedimento di prova: Prima di introdurre il campione, verificare che il cilindro sia pulito. Introdurre con cura nella macchina dapprima le sfere, quindi il campione di prova. Chiudere il coperchio e far compiere alla macchina 500 giri a velocità costante compresa fra 31 giri/min e 33 giri/min. Versare l'aggregato in un vassoio collocato sotto l'apparecchiatura facendo attenzione che l'apertura si trovi esattamente sopra il vassoio per evitare la perdita di materiale. Pulire il cilindro rimuovendo tutti i fini facendo particolare attenzione alla zona attorno alla mensola sporgente. Rimuovere con cura il carico di sfere dal vassoio facendo attenzione a non perdere particelle di aggregato.

Analizzare il materiale del vassoio conformemente alla EN 933-1:1997 lavandolo e vagliandolo con uno staccio da 1,6 mm. Essicare la porzione trattenuta sullo staccio da 1,6 mm a una temperatura di $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ fino a quando non raggiunga massa costante.

5.4- Calcolo ed espressione dei risultati: Calcolare il coefficiente Los Angeles, LA, mediante l'equazione seguente:

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad (3.11)$$

Dove: m è la massa trattenuta al setaccio da 1,6mm, in grammi. Arrotondare il risultato all'intero più prossimo.

5.5- Resoconto di prova: Il resoconto di prova deve riportare che la prova Los Angeles è stata eseguita conformemente alla presente norma e contenere le informazioni seguenti:

- a) nome e origine del campione;
- b) frazioni granulometriche dalle quali è stata ottenuta la porzione di prova;
- c) coefficiente Los Angeles, LA.

6- *Determinazione della resistenza alla frammentazione mediante il metodo della prova d'urto*
Omissis

Appendice A: Classi granulometriche ristrette alternative per la prova Los Angeles

I seguenti scostamenti dalla prova di riferimento (vedere 5.2) possono fornire informazioni supplementari per determinati impieghi finali. A tale scopo, è possibile utilizzare le classi granulometriche ristrette contenute nel prospetto sottostante. Utilizzare stacci di prova delle dimensioni appropriate per rispecchiare le classi granulometriche.

Classi granulometriche alternative:

Classe granulometrica mm	Numero di sfere	Massa della carica di sfere g
da 4 a 8 (6,3)	8	da 3410 a 3540
da 6,3 a 10 (8)	9	da 3840 a 3980
da 8 a 11,2 (10)	10	da 4260 a 4420
da 11,2 a 16,00 (14)	12	da 5120 a 5300

3.7.8. NORMA CNR-UNI 10014

DETERMINAZIONE DEI LIMITI DI CONSISTENZA (O DI ATTERBERG) DI UNA TERRA

1- Generalità

I limiti di consistenza (o di Atterberg) sono i valori di umidità di una terra assunti convenzionalmente per caratterizzare i passaggi: dallo stato liquido allo stato plastico (limite dello stato liquido W_L); dallo stato plastico allo stato semisolido (limite dello stato plastico W_P); dallo stato semisolido allo stato solido (limite di ritiro W_S).

I limiti di consistenza devono essere determinati su materiale passante allo staccio 0,425 UNI 2332. La stacciatura deve essere eseguita su materiale previamente essiccato a temperatura non maggiore di 50°C e disgregato con un pestello gommato, evitando di frantumare i singoli granuli della terra.

2- Limite dello stato liquido W_L di una terra

2.1- Definizione

Limite dello stato liquido W_L (limite liquido, limite di liquidità) di una terra è l'umidità in corrispondenza della quale la terra assume la consistenza individuata dalla prova indicata al 2.3.

2.2- Apparecchiatura di prova

2.2.1.- Un apparecchio illustrato nella figura 1 e costituito da una coppa di ottone con dispositivo meccanico che consenta la caduta ripetuta della coppa su di una base di ebanite dall'altezza di 10mm.

2.2.2.- Un utensile.

2.2.3.- Una spatola.

2.2.4.- Apparecchiatura per la determinazione dell'umidità.

2.3- Esecuzione della prova

2.3.1.- Si pesano in una capsula 100÷150g di terra, preparata come indicato al punto 1, si aggiungo piccole quantità di acqua distillata e si miscela accuratamente dopo ogni aggiunta per distribuire nella migliore maniera possibile l'acqua in tutta la terra. Si ripete questa operazione fino a ottenere un'umidità minore del presumibile limite dello stato liquido, ovvero una consistenza all'incirca corrispondente alla chiusura del solco, di cui al punto 2.3.3., con almeno 35 colpi. Si lascia maturare la terra in ambiente umido per un tempo dipende dalle caratteristiche della stessa e comunque non minore di 12 ore.

2.3.2.- Quindi, dopo aver proceduto a un ulteriore rimescolamento, si divide il campione in almeno 4 parti eguali.

2.3.3.- Si pone una di queste nella coppa di ottone dell'apparecchio e la si liscia con la spatola in modo che sia limitata superiormente da una superficie piana parallela al bordo della coppa e che

lo spessore massimo corrisponda all'incirca a 10mm. Indi con l'utensile si traccia un solco diametrico dall'alto verso il basso, avendo cura di asportare la terra dal solco fino al fondo della coppa.

Ruotando la manovella si fa cadere la coppa sulla base con una frequenza di 2 colpi al secondo, finché il solco si chiuda per una lunghezza di 13mm, e si rileva il numero di colpi. Si preleva quindi un piccolo quantitativo di terra dal centro della coppa e se ne determina l'umidità.

2.3.4.- Dopo aver umidificato le rimanenti parti del campione di cui al punto 2.3.2. con contenuti crescenti di acqua ed averle rimescolate ciascuna accuratamente, si ripete l'operazione di cui al punto 2.3.3. fino a ottenere la chiusura del solco per diversi numeri di colpi compresi tra 35 e 10.

2.3- Elaborazione dei risultati

2.4.1.- Si riportano in un diagramma semilogaritmico, avente in scala lineare le umidità ed in scala logaritmica i numeri dei colpi, i punti corrispondenti ai 4 o più risultati della prova e si traccia la retta passante per i punti così trovati. Si legge su tale la retta l'umidità corrispondente al numero dei colpi pari a 25: l'umidità così individuata è per definizione il limite dello stato liquido.

2.4.2.- Il risultato, espresso in percentuale, deve essere arrotondato all'unità.

3- Limite dello stato plastico W_p di una terra

3.1 Definizione

Limite dello stato plastico W_p (limite plastico, limite di plasticità) di una terra è l'umidità in corrispondenza della quale la terra assume la consistenza individuata dalla prova indicata al punto 3.3.

3.2 Apparecchiatura

3.2.1 Una capsula di porcellana del diametro di 100-120 mm.

3.2.2 Una spatola

3.2.3 Un piano di vetro smerigliato o di marmo levigato

3.2.4 Apparecchiatura per la determinazione dell'umidità.

3.3 Esecuzione della prova

Circa 15 g di terra, preparata e trattata come indicato ai punti 1. E 2.3.1., vengono ulteriormente rimescolati e con essi si forma una pallina all'incirca sferica. La pallina è messa sul piano di prova di cui al punto 3.2.3., indi, mediante lieve compressione e rullatura con le dita di una mano, essa è ridotta a un cilindretto del diametro di 3 mm. Se il cilindretto di terra si rompe prima che tale diametro sia raggiunto, occorre bagnare ulteriormente la terra e ripetere la prova; se invece si può scendere al di sotto dei 3 mm di diametro senza che il cilindretto si rompa in frammenti di 5-10

mm di lunghezza, occorre ripetere la prova fino a che il cilindretto, essiccandosi per effetto delle successive manipolazioni, si sbricioli non appena raggiunto il diametro di 3 mm.

Si raccoglie la terra così sbriciolata e se ne determina l'umidità.

3.4 Elaborazione dei risultati

3.4.1 L'umidità così determinata indica il limite dello stato plastico della terra

3.4.2 La prova deve essere ripetuta due volte. Le due determinazioni non devono differire fra loro di più di una percentuale. In caso contrario la prova deve essere ripetuta, scartando i valori precedentemente ottenuti.

3.4.3 Il risultato, eguale alla media delle due determinazioni, deve essere arrotondato all'unità.

4- *Indice di plasticità I_p*

La differenza $W_L - W_P$ è detta indice di plasticità I_p . Per terre non plastiche si considera convenzionalmente $I_p=0$.

3.8. I LEGANTI

Il bitume è un composto organico costituito sostanzialmente da miscele di idrocarburi e deriva, come prodotto ultimo, della raffinazione del petrolio. È completamente solubile nel solfuro di carbonio CS_2 (solvente infiammabile e tossico). In commercio si possono trovare due tipologie di bitume:

- di origine naturale: è il bitume formatosi a seguito di fenomeni geologici naturali nel corso dei millenni, in seguito a un processo di separazione del petrolio grezzo in condizioni di elevate temperature e pressioni dove si è avuta la separazione degli idrocarburi aromatici;
- di origine industriale: è il bitume ottenuto per raffinazione dei petroli greggi e non è altro che la sua frazione più pesante.

La differenza sostanziale tra un bitume di origine naturale e uno di industriale è nella loro natura chimica: questi sono diversi sia da un punto di vista reologico sia da un punto di vista meccanico. Oltre a questo i bitumi industriali differiscono a seconda della provenienza del greggio.

Dal punto di vista chimico-fisico, il bitume è una miscela estremamente complessa che dà luogo a un sistema multifasico di natura colloidale. Le 2 classi principali presenti nel bitume sono gli asfaltini e i malteni. Gli asfaltini rappresentano il corpo viscoso del bitume, mentre i malteni la componente più fluida. Gli asfaltini si attribuiscono la natura viscosa e le principali caratteristiche meccaniche e di adesione del bitume. I malteni conferiscono al bitume la capacità (alla temperatura di lavorazione) di "bagnare", ossia di ricoprire estese superfici di un altro materiale.

Gli asfalti sono una componente ricca di macromolecole a struttura aromatica dotate di un elevato peso molecolare. I malti sono delle strutture molecolari talifatiche con un peso molecolare 10-15 volte più basso rispetto a quello degli asfalti.

Con un elevato contenuto di asfalti però si otterrebbe un bitume più rigido e quindi più fragile (più sensibile ai fenomeni di fatica), questo perché le resine non sono più in grado di conferire al bitume quelle caratteristiche di elasticità/duttilità necessarie.

L'invecchiamento della miscela è un processo naturale in cui è sottoposto il bitume ovvero un'ossidazione naturale e quindi un processo di degrado: questo è dovuto al fatto che il bitume perde elasticità e duttilità, diventando fragile e sensibile alla fatica, soprattutto nei mesi più freddi. Questo è un aspetto negativo a cui tutti i bitumi sono soggetti.

La composizione chimica del bitume è:

- 80% di carbonio;
- 10% di idrogeno;
- 10% di zolfo, azoto e ossigeno;
- tracce di alcuni metalli come nichel, ferro e magnesio.

L'emulsione bituminosa è una dispersione di bitume in acqua. Questa non può essere impiegata a caldo come legante, ma essa può essere utilizzata come mano d'attacco, per favorire l'aderenza tra strati di pavimentazione contigui, oppure può essere utilizzata come impermeabilizzante. Per rendere stabili tali emulsioni è necessario utilizzare particolari agenti tensio-attivi detti emulsivi. L'emulsivo favorisce la emulsionabilità del bitume a causa della riduzione della tensione superficiale delle pellicole del bitume stesso. Le emulsioni possono essere acide (o cationiche) se gli emulsivi sono dei saponi alcalini, oppure basiche (o anioniche) se invece gli emulsivi sono dei sali d'ammonio. A parità di viscosità del bitume, la rottura dell'emulsione acida si ottiene a una temperatura molto più bassa che non per quelle basiche (ad esempio a temperatura ambiente). Questo fatto viene associato alla possibilità di utilizzare le emulsioni acide anche con materiali litici bagnati: si determina la preferenza delle emulsioni cationiche per lavori in periodo invernale o in regioni a clima umido e freddo. Per punto di rottura di una emulsione si intende la separazione tra il bitume e il liquido emulsionante. Normalmente si verifica quando l'emulsione bagna l'aggregato, il quale resta rivestito di bitume mentre l'acqua evapora.

3.8.1. BITUMI MODIFICATI/ADDITIVATI/POLIMERICI

I bitumi modificati o additivati sono bitumi che presentano delle proprietà reologiche migliorate, grazie all'aggiunta di polimeri ad alto peso molecolare (elastomeri o resine termoindurenti):

- bitumi modificati: nei bitumi modificati si agisce solamente a livello del legante, cioè del bitume, infatti questo viene ad essere mescolato per due ore a 180°C assieme al polimero. Si ottiene un bitume che ne assume le proprietà meccaniche e reologiche del polimero che, però, non è più scindibile dal bitume una volta mescolato. La modifica può essere soft con percentuali che possono arrivare al 5-6%, oppure può essere hard ed in questo caso si può arrivare al 50% del peso.
- bitumi additivati: l'additivazione è un processo diverso, infatti l'additivo viene inserito assieme all'aggregato nell'impianto di produzione del conglomerato. Rispetto al caso precedente il processo di mescola è molto più rapido e, a temperatura meno controllata, il miglioramento complessivo delle caratteristiche del conglomerato è marcatamente inferiore a quello che si potrebbe ottenere con un bitume modificato, ed inoltre spesso l'aggiunta è ancora distinguibile all'interno dell'impasto.
- leganti polimerici: questi sono formati da polimeri puri a basso peso molecolare. Un esempio lo sono le resine epossidiche che hanno elevate proprietà meccaniche oltre a essere fortemente impermeabili.

Dato il loro elevato costo hanno un impiego piuttosto limitato quindi, per ragioni economiche, vengono miscelate con sabbia senza per questo alterare notevolmente le proprietà essenziali della resina di partenza.

3.8.2. PREGI E DIFETTI DEL BITUME

I pregi e i difetti del bitume sono:

- materiale visco-elastico il cui comportamento meccanico è molto sensibile alla temperatura e alla velocità di applicazione dei carichi;
- a temperatura ambiente la consistenza del bitume è quella di un (semi)solido;
- alle basse temperature la rigidità aumenta notevolmente(possibile comportamento fragile);
- intervallo di temperatura di esercizio su strada pari all'intervallo compreso tra -15°C e +60°C;
- intervallo della temperatura di lavorazione (confezione e posa in opera delle miscele bituminose) pari all'intervallo compreso tra 140°C e 180°C.

Due sono i fattori in cui il bitume è dipendente: tempo di carico (espresso in termini di frequenza) e temperatura. Più alta è la frequenza di carico (quindi minori sono i tempi di carico) si ottengono

moduli di rigidità maggiori, quindi per le pavimentazioni stradali sono maggiormente pericolosi i carichi di lunga durata (ad esempio la sosta di un mezzo pesante). Oltre a questo, il bitume dipende anche dalla temperatura di esercizio infatti più questa è elevata più il bitume risulta essere tenero, con un basso modulo di rigidità e una elevata capacità deformativa. Invece, a temperature più basse il bitume assume un comportamento elastico/fragile. A queste temperature esso diviene sensibile al fenomeno della fatica, cioè all'accumulo di microfratture nel tempo. In figura 11 sono rappresentate gli intervalli di temperatura che il bitume sopporta durante la sua esistenza:

-in esercizio si possono avere delle temperature comprese tra i -15°C e i $+60^{\circ}\text{C}$;

-le temperature di lavorazione partono dai 140°C , fino ad arrivare ai 200°C per le miscele colabili.

Mentre i bitumi modificati vengono lavorati a temperature intorno ai 180°C .

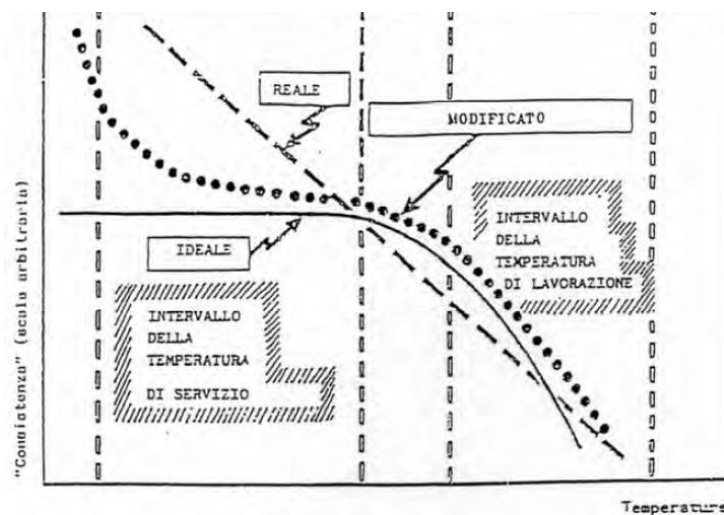


Figura 3.12. Diagramma Consistenza-Temperatura

Dal grafico si può osservare come la viscosità nell'ambito dell'intervallo di esercizio dovrebbe mantenersi sensibilmente costante e molto elevata. Invece, nell'intervallo di lavorazione la viscosità dovrebbe essere molto bassa e praticamente vicina a quella dell'acqua allo scopo di consentire le varie fasi di posa in opera delle miscele bituminose.

3.8.3. CONGLOMERATO BITUMINOSO

Il conglomerato bituminoso è un conglomerato artificiale costituito da una miscela di aggregati (materiali rocciosi di diversa granulometria quali filler, sabbia e pietrisco) e un legante di tipo bituminoso.

Il conglomerato bituminoso viene chiamato comunemente, anche se erroneamente, asfalto, che invece si può considerare un conglomerato bituminoso naturale.

Il bitume riveste a uno a uno gli aggregati, tenendoli uniti per formare un unico elemento capace di resistere alle sollecitazioni indotte dal traffico e alle aggressioni degli agenti atmosferici.

Il processo di confezionamento prevede un'energetica miscelazione della miscela, in modo da favorire la ricopertura dell'aggregato. Una miscelazione ottimale si ottiene a una temperatura in cui il bitume ha una fluidità tale da ricoprire facilmente gli aggregati della miscela, formando un sottile film di bitume su ogni singolo grano di materiale lapideo. Della qualità di questo sottile film dipenderà la durata nel tempo del conglomerato bituminoso. In particolare, la forza di adesione di questo film di bitume sui grani rappresenta il punto critico di tutto il processo di fabbricazione di una pavimentazione stradale. Si può notare che, a una data temperatura, la viscosità diminuisce con l'aumentare delle penetrazione del bitume. In pratica, se si dovesse produrre un conglomerato bituminoso utilizzando bitumi a diversa penetrazione, per avere la stessa viscosità sarebbe necessario applicare temperature diverse durante la fase di miscelazione. Solitamente le temperature ottimali per raggiungere la corretta viscosità sono pari a 160-180°C. Anche i materiali lapidei vengono riscaldati alla stessa temperatura del bitume per mezzo di forni a tamburo rotante. La funzione principale dei forni, definiti cilindri essiccatori, è quello di eliminare prima l'umidità contenuta negli inerti e, successivamente, di riscaldarli alla temperatura di miscelazione voluta. Dopo la fase di confezionamento dei conglomerati bituminosi, la realizzazione di una pavimentazione stradale prevede le fasi di trasporto, stesa e compattazione. L'adesione tra bitume-inerte è il punto critico di tutto il processo di realizzazione di un conglomerato bituminoso, ma di fondamentale importanza, per l'ottenimento di una strada resistente, è la compattazione, che deve essere effettuata con una adeguata energia meccanica.

4. CARATTERIZZAZIONE STATICA E DINAMICA DEI CONGLOMERATI

Una sovrastruttura stradale dovrà rispondere a requisiti strutturali e funzionali tra le quali elevata capacità portante, supporto di sollecitazioni e sicurezza all'utente. Per rappresentare tutto ciò è stato identificato un parametro chiave: il modulo elastico. Esso rappresenta la misura della capacità di una pavimentazione a trasferire nella struttura della pavimentazione il carico esercitato sulla superficie carrabile tramite le aree d'impronta dei pneumatici del veicolo. Quindi a parità di condizioni ambientali, di posa e tipologia di carico, una pavimentazione con un alto modulo di rigidità riesce a trasferire sul sottofondo carichi su un'area più ampia e quindi, rispetto a una pavimentazione di minor modulo, con un'intensità minore.

Dato che il conglomerato bituminoso è un materiale eterogeneo il cui comportamento dipende da temperatura e velocità di applicazione dei carichi, la risposta sarà quindi in parte elastica e in parte viscosa. Sotto l'azione di carichi ripetuti si possono avere deformazioni reversibili (quindi deformazioni elastiche e visco-elastiche) e irreversibili (plastiche e visco-plastiche).

Il valore di tale modulo è definito dal rapporto tra la tensione monoassiale σ e la deformazione ε corrispondente:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.1)$$

La legge costitutiva di un materiale, che mette in relazione tensione e deformazione, è caratterizzata da un parametro, detto modulo. Nei materiali elastici si tratta di un modulo elastico (o modulo di Young), mentre in quelli visco-elastici, come il conglomerato bituminoso, viene definito un modulo complesso.

Le prove che si eseguiranno sui provini saranno di tipo statico e dinamico. Per statico ci si riferisce a prove applicate sul conglomerato bituminoso con carichi costanti nel tempo, mentre per dinamico è quello caratteristico del materiale sotto carichi dinamici (quindi che ricalcano meglio la realtà).

4.1. CARATTERIZZAZIONE STATICA DELLE MISCELE BITUMINOSE

La configurazione di prova per la determinazione della rigidità statica è la prova di "creep statico". La prova consiste in una compressione verticale monoassiale ovvero la sollecitazione avviene viene applicata lungo l'asse del provino. Solitamente quest'ultimo ha forma cilindrica senza confinamenti laterali e statici.

La prova, definita statica, non significa che si applica un carico che induce una velocità di deformazione costante ma perché viene applicata una tensione costante nel tempo. Il conglomerato bituminoso è tempo dipendente ovvero la risposta meccanica del materiale dipende dal tempo di applicazione del carico.

La tensione è quindi costante per un intervallo di tempo per tutta la durata della prova per simulare per esempio il parcheggio di un'auto.

4.1.1. MODULO RIGIDEZZA DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI E BITUMI

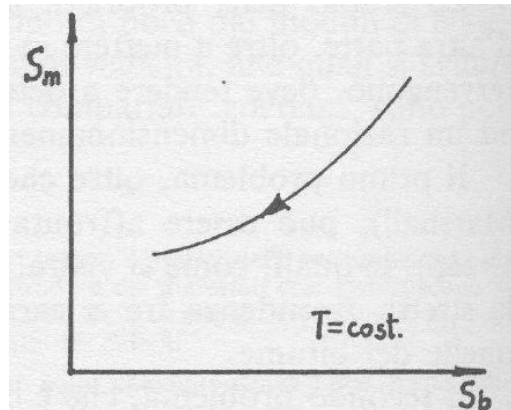


Figura 4.1. Correlazione tra conglomerati e bitumi

In una prova di creep per un conglomerato bituminoso, ma anche per un bitume, la rigidezza si calcola come rapporto tra la tensione (che rimane costante) e deformazione ε dove quest'ultima dipende dal tempo di applicazione e dalla temperatura di esercizio.

$$S_m = \text{Stiffness mixer} \qquad S_m = \frac{\sigma_m}{\varepsilon(t, T)} \qquad (4.2)$$

$$S_b = \text{Stiffness bitumen} \qquad S_b = \frac{\sigma_m}{\varepsilon(t, T)} \qquad (4.3)$$

C'è quindi una correlazione tra S_m e S_b rappresentata in fig.3 perché il conglomerato bituminoso eredita tutte le proprietà del bitume. Eseguendo quindi una prova di creep su un conglomerato e su un campione di bitume dello stesso tipo, il rapporto tra le due rigidezze permette di ottenere una nuvola di punti che si riesce in qualche modo a correlare. Questo sta a indicare come le proprietà reologiche del conglomerato sono fortemente dipendenti da quelle del bitume.

La rigidezza statica però non è sufficiente per caratterizzare il comportamento del materiale: bisogna anche considerare il carico ciclico dovuto al traffico veicolare.

4.2. CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DELLE MISCELE BITUMINOSE

La caratterizzazione delle miscele ha bisogno di un'ulteriore parametro per la rappresentazione della risposta meccanica del materiale. I conglomerati hanno un comportamento viscoelastico/viscoplastico e tutto dipende dal tempo di applicazione del carico e dalla temperatura di esercizio. Spesso nelle prove però viene considerato un comportamento viscoelastico lineare.

Si ha quindi a disposizione un provino cilindrico Marshall o derivante dalla pressa giratoria e lo si va a sollecitare in modo monoassiale ma non con un carico statico ma con un carico pulsante con una legge sinusoidale. Viene quindi applicata una forza di compressione in modo tale da simulare il passaggio dei veicoli.

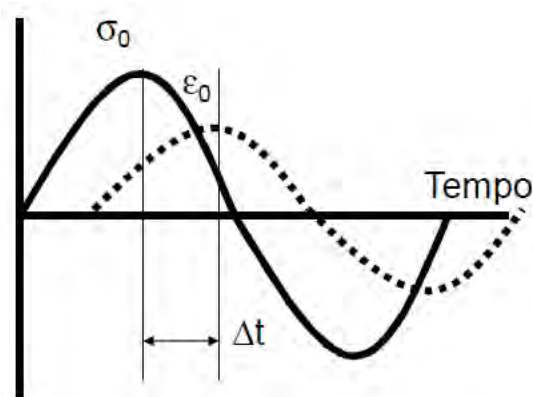


Figura 4.2. Andamento sinusoidale della tensione

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \text{sen} \omega t \quad (4.4)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (4.5)$$

La $\sigma(t)$ varia quindi secondo una legge sinusoidale dove ω è la pulsazione e σ_0 è la massima ampiezza della sollecitazione. Come la tensione sarà sinusoidale, anche la deformazione di conseguenza lo sarà. All'interno della formula (2.6) compare φ definito come "ritardo di fase" ovvero un parametro che tiene conto della risposta ritardata del provino in seguito a una sollecitazione a causa della natura visco-elastica del conglomerato bituminoso.

$$\omega = \frac{2\Pi}{T} \quad (4.6)$$

$$f = \frac{T}{2\Pi} \quad (4.7)$$

$$\Delta t = \frac{\varphi}{\omega} \quad (4.8)$$

T è il periodo di tempo che intercorre da quando si applica il carico fino a quando lo si scarica.

Δt è il ritardo di fase ed è un valore finito e calcolabile tramite la formulazione 4.8.

Definito quindi il modulo:

$$\dot{E} = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_0 \text{sent}}{\varepsilon_0 \text{sen}(\omega t - \varphi)} \quad (4.9)$$

tale relazione diventerebbe poco gestibile e quindi si opta per considerare il rapporto tra la massima tensione e la massima deformazione e ci si accontenta di avere un valore assoluto ovvero la norma del modulo:

$$|E(t)| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (4.10)$$

Però questo rapporto, definito come modulo complesso, non è sufficiente per descrivere il comportamento del materiale. Nella formulazione (2.10) compare il termine “ φ ” e quindi un ritardo di fase a causa del comportamento visco-elastico anche se sia troppo difficile da gestire. Nella formula (2.11) invece, anche se più facile da calcolare, non compare il termine φ e quindi si commette l’errore di non considerare l’effetto visco-elastico. Si stanno allora considerando 2 equazioni inefficienti.

Il modulo complesso E quindi rappresenta il comportamento visco elastico in un piano complesso da cui si può osservare (fig. 5) come il modulo venga rappresentato dalla combinazione di una componente elastica E_1 e una viscosa E_2 ed è individuato rispetto all’orizzontale dall’angolo “ φ ”.

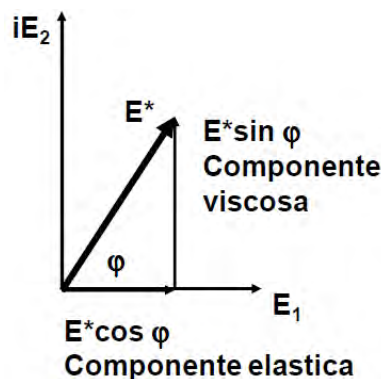


Figura 4.3 Modulo complesso

E^* è il modulo complesso rappresentato in un piano complesso. In sintesi tale modulo può essere rappresentato dalla seguente formulazione:

$$|E^*| = \text{Modulo complesso} \qquad |E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \qquad (4.11)$$

Dove:

$E_1 = E \cdot \cos \varphi$: Modulo di restituzione ovvero la parte elastica del modulo complesso che governa la risposta elastica cioè la componente recuperabile della deformazione.

$E_2 = E \cdot \sin \varphi$: Modulo di dissipazione: è la parte che scrive il comportamento viscoso del materiale quindi non recuperabile. Dissipazione perché la parte viscosa è responsabile della dissipazione di energie durante i cicli di carico e quindi delle deformazioni permanenti.

$$\varphi = \arctan \frac{E_2}{E_1} \qquad (4.12)$$

Osservazione: con un angolo φ piuttosto piccolo, il vettore E^* tenderà all'orizzontale. Questo perché tanto più piccolo è l'angolo tanto più piccola sarà la quota di deformazione non recuperabile. Quindi bisognerebbe progettare il materiale in modo tale che φ sia piccolo e che il modulo complesso sia ragionevolmente alto.

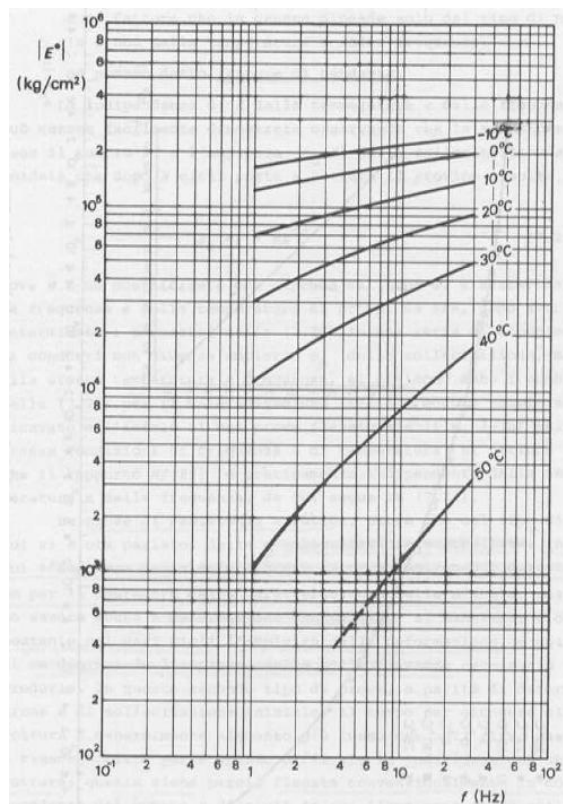


Figura 4.4. Temperatura, frequenza e modulo complesso

In Figura 4.4 viene rappresentato il grafico dove si mette in relazione la frequenza di carico e il modulo complesso in funzione di una variazione della temperatura. Dal grafico si nota come un materiale sottoposto a una frequenza piuttosto elevata comporta moduli di rigidezza alti. Il problema resta quindi il traffico lento dove comporta frequenze inferiori e quindi moduli piccoli. Un'altra dipendente che si dovrebbe tenere conto è la temperatura infatti bisogna sempre fissare le condizioni di prova. A una temperatura elevata comporta un incremento nel bitume delle deformazioni permanenti. A sua volta, a un incremento di temperatura, a parità di frequenza di carico si avrà quindi una diminuzione del modulo di complesso.

4.3. MODULI DI RIGIDEZZA - ANNESSI

Il modulo di rigidezza, definito come valore assoluto del modulo complesso, è un parametro meccanico razionale sintetico ovvero descrive in modo compatto le proprietà tensio-deformative del materiale. Tale modulo viene utilizzato per identificare le miscele in campo stradale: maggiore sarà il modulo della miscela, maggiori saranno le proprietà meccaniche. Quindi esprime in modo sintetico tali proprietà. Un materiale con rigidezza maggiore ha la capacità di ridistribuire tensioni più piccole in un'area più ampia quindi ottima per evitare il punzonamento.

Tale modulo poi è prestazionale perché appunto la prestazione è la capacità di distribuire le tensioni allo strato sottostante. Dal modulo di rigidezza ci si riconduce quindi ad altre prestazioni come per esempio all'ormaiamento (accumulo di tensioni permanenti) e fatica.

È razionale perché è un σ/ε e lo si determina con diverse procedure a seconda dei paesi dell'unione europea.

In laboratorio si hanno diversi protocolli di prova a disposizione descritti dalla norma UNI EN 12697-26. Quest'ultima descrive diverse modalità di calcolo e per ogni paese dell'UE ha la propria modalità per il calcolo del modulo di rigidezza E, non fornendo però gli stessi valori per ogni prova. Questo perché il modulo è una proprietà intrinseca del materiale e deve avere un solo valore per ogni singola sollecitazione. Quindi, avere prove diverse significa avere sollecitazioni e moduli diversi. In seguito, (fig.7) le diverse modalità di prova:

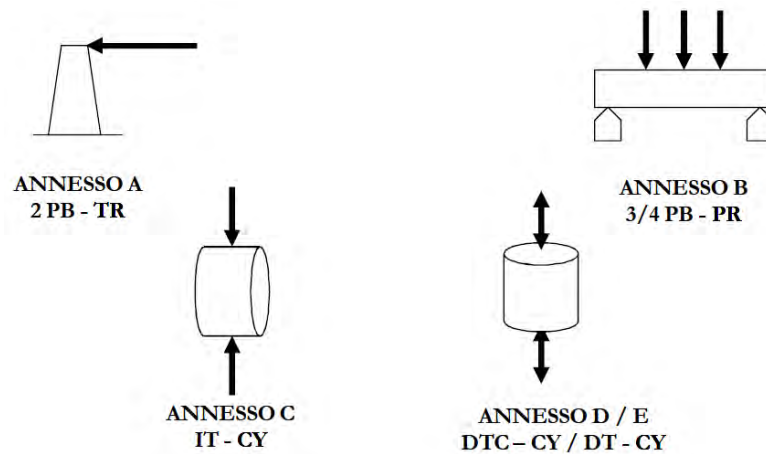


Figura 4.5.UNI EN 12697-26

Generalmente le prove che generano lo stato tensiodeformativo sono:

Flessione:

- flessione su 2punti;
- flessione su 3 punti;
- flessione su 4punti;
- flessione con rotazione.

Carico Assiale diretto:

- trazione a compressione di provini cilindrici;
- trazione a compressione di provini a clessidra.

Carico diametrale:

- trazione indiretta.

In Italia si fa uso dell'annesso C quindi una configurazione a trazione indiretta ovvero carico diametrale. È la più diffusa perché è la più semplice e la meno costosa.

4.3.1. PROVA A TRAZIONE INDIRETTA

La prova a trazione indiretta vede l'uso di provini cilindrici caricati lungo tutto lo spessore con una forza verticale che sviluppa tensioni normali di compressione nel piano diametrale orizzontale e tensioni normali di compressioni in quello verticale.

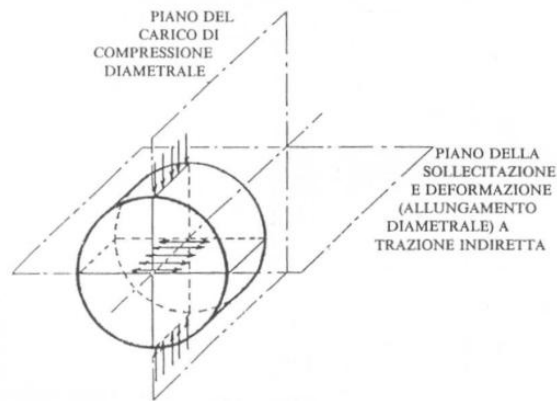


Figura 4.6. Piani della prova a trazione indiretta

I provini vengono posizionati tra due listelli mentre un pistone applica un carico di compressione lungo un piano diametrale verticale coassiale. Con un sistema di coordinate polari è possibile si è in grado di calcolare la tensione in qualsiasi punto ma in particolare si è interessati alla massima ovvero al centro del provino:

$$\sigma_{\max} = \frac{2P}{\pi Dh} = R_t \quad (4.13)$$

La resistenza a trazione indiretta è R_t ovvero pari alla massima tensione di trazione orizzontale. Il termine P è pari al carico massimo al momento della frattura del provino, D è il diametro, h è l'altezza del provino. Se la prova brasiliana e la prova Marshall hanno velocità di deformazione costante, il carico non può rimanere costante ma deve crescere, quindi, per mantenere costante la deformazione il carico deve aumentare. Il massimo carico che si registra è quello che si usa per il calcolo della tensione massima quindi della resistenza a trazione indiretta R_t . Si misura quest'ultima in MPa quindi è un parametro meccanico. Il modulo di rigidezza a trazione indiretta quindi si configura, geometricamente parlando, come una prova a trazione indiretta. Si deve quindi riprodurre un'onda a forma sinusoidale in modo tale da simulare il carico dovuto al passaggio dei veicoli.

4.3.2. UNI EN 12697-26 - ANNESSO C - PROVA ITSM

In questo particolare protocollo si fa una leggera modifica rispetto al modulo complesso $|E^*|$. Nel modulo complesso il passaggio veicolare era espresso tramite una sinusoide, quindi un passaggio ciclico dei veicoli. Tra un passaggio e l'altro intercorre poi un certo tempo. Con l'annesso C, si è pensato di applicare il carico con una pseudo-sinusoide (un quarto di sinusoide) e poi uno scarico lineare sempre per un quarto di sinusoide.

Questa onda che si forma simula il passaggio del veicolo singolo. Dopo lo scarico, avviene il tempo di ripetizione ovvero il tempo che intercorre dal passaggio di un veicolo e il passaggio del successivo veicolo.

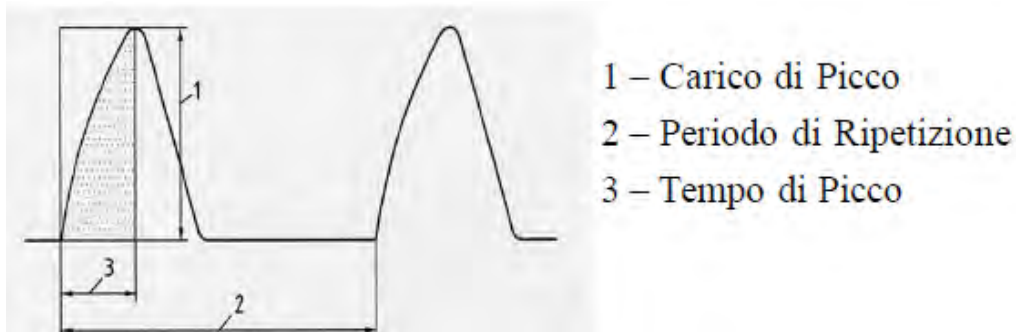


Figura 4.7. Curva pseudo sinusoidale

Quindi l'annesso C, che è il protocollo scelto in Italia, non ha una forma a onda come il modulo complesso ma un'onda composta. Con questo metodo si va a studiare cosa succede sul piano diametrale orizzontale dopo aver esercitato un impulso di compressione con un pistone che comprime diametralmente (come nella trazione indiretta). Quindi c'è un castello che permette di sostenere il provino cilindrico durante la prova e 2 trasduttori laterali che monitorano cosa succede orizzontalmente.

Per determinare il modulo di rigidezza si può operare in 2 maniere:

- con controllo dei carichi;
- controllo della deformazione.

Il protocollo EN 12697 opera in controllo di deformazione ovvero si deve indurre una deformazione diametrale di 5micron. Quindi si applica il carico, il provino si deforma, e dopo di che si controlla l'ampiezza della deformazione. Siccome la prova avviene con una deformazione al di sotto di 25micron, si ritiene che il provino operi in campo elastico, non si hanno deformazioni permanenti e quindi la prova non è distruttiva. La rigidezza quindi viene determinata con la formula:

$$S_m = \frac{F(v + 0.27)}{z \cdot h} \quad (4.14)$$

F è il carico, v è il coefficiente di Poisson, "z" è l'altezza del provino mentre "h" è la deformazione imposta. Il tempo del carico è pari a 125ms ovvero pari al tempo di picco, quindi il tempo che intercorre da quando si inizia la prova e quando si raggiunge il massimo valore di carico. Il tempo di picco è il tempo di crescita del carico quindi un quarto di senoide ed è definito anche "rise time". Non ha senso parlare di frequenza in queste prove perché non si ha un'onda continua. Se si avesse un'onda continua si può parlare di tempo di ripetizione del ciclo.

Su questo protocollo non si parla di frequenza ma si parla solo di tempo di applicazione di carico ovvero 125ms. Si ammette allora una pseudo frequenza quindi una frequenza fittizia: $4 \cdot 125$ quindi $=500=1/500=2\text{Hz}$ infatti sulla norma sono 2Hz.

Esiste una legge di Klomp che associa a una frequenza di 10Hz una velocità del traffico di circa 50km/h. A questa frequenza però verrà richiesto quindi un tempo di picco di 25ms ma le macchine pneumatiche moderne fanno fatica a raggiungere questo tempo.

La prova, in condizioni standard, viene eseguita a 20°C. A questa temperatura si hanno deformazioni piccole a comportamento pseudo elastico cioè la parte viscosa è molto piccola quindi il modulo di rigidezza che si troverà sarà un modulo visco elastico ma con un carattere elastico. Si parla quindi di un modulo quasi elastico. Già a 40°C si possono associare al provino deformazioni permanenti.

4.3.3. MODULO RESILIENTE

È un modulo di rigidezza che si trova sul protocollo americano ASTM 4123. È un modulo di rigidezza che si trova per trazione indiretta, stessa geometria di prova della prova di prima, ma ci sono delle differenze sostanziali.

La resilienza è pari a M_r (resilient modulus):

$$M_r = \frac{\sigma}{\varepsilon_r} \quad (4.15)$$

definita quindi da una tensione rapportata a una deformazione recuperabile. La differenza è che, rispetto all'annesso C, il modulo resiliente viene determinato tramite il controllo di carico ovvero si impone un carico (quindi una tensione σ) e si misura la deformazione. Quest'ultima non deve superare i 25micron. In entrambi i casi le prove sono entrambe impulsive-cicliche: 5 cicli di carico per poi ottenerne uno finale che sarà la media dei precedenti. Altra cosa in comune è l'asse lungo la quale calcolare il modulo. Per entrambi i casi vengono calcolati i moduli su 2 diametri, prima uno poi l'altro, ottenuti ruotando il provino di 90°. Se i risultati di un lato differiscono del 20% rispetto all'altro, allora si consiglia di rifare la prova o, al limite, di rifare il provino.

Il valore finale del modulo è data dalla media totale della media dei 5 cicli su un diametro e la media dei 5 cicli sull'altro diametro.

In sintesi, nelle applicazioni reali, il modulo complesso è utilizzato per lo studio di cosa avviene sotto alla ruota di carico al contatto con la pavimentazione, invece il modulo di rigidezza è utilizzato per l'analisi ai lati del punto di carico della ruota.

4.4. FATICA

Dato il continuo passaggio di veicoli la pavimentazione subisce cicli di carico che inducono tensioni di trazione nella sovrastruttura. Questi continui cicli di deformazione influenzano notevolmente le proprietà meccaniche della pavimentazione in seguito a un degrado del materiale dovuto alla formazione e propagazione di micro fessurazioni. Accade così che la fessurazione interessi l'intera pavimentazione e quindi comprometterebbe la capacità di resistere ai carichi.

Il materiale deve essere allora progettato in modo tale che quest'ultimo sappia distribuire al meglio i carichi sottostanti alla pavimentazione stessa. Questo comporterebbe un elevato modulo, ma non basterebbe per la buona progettazione: bisogna evitare le fessurazioni quindi garantire una resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti.

Le fessure possono avere due forme:

- lineari e trasversali alla pavimentazione quindi dovute a uno shock termico;
- reticoli di fessura (a pelle di coccodrillo) che indicano che la pavimentazione si è rotta per fatica/accumulo di danno (che dal punto macroscopico si traduce in fessure).

Diverse sono le cause dell'ammaloramento:

-transito veicolare:

il transito ripetuto a 20°C causa un danno microstrutturale che accumulandosi induce la formazione di fessure. A questa temperatura quindi si formerebbero le prime fessure, mentre a 40°C si ha un accumulo di deformazioni permanenti quindi formazione di buche. Si può interpretare l'accumulo di danno a fatica come un accumulo di deformazioni viscoelastiche.

-variazione delle caratteristiche del materiale nel tempo:

il materiale si invecchia perché nel bitume, che è un materiale organico, avviene una reazione chimica per la presenza di ossigeno nella quale i malteni si trasformano in asfalteni (responsabili della resistenza meccanica). Si ha quindi una concentrazione negativa di asfalteni e succede che con il tempo il materiale diventa fragile. L'ossidazione è una esaltazione della fatica;

-condizioni ambientali:

gelo e variazioni di temperatura. A 0°C il fenomeno della fatica è risalta molto mentre all'aumentare della temperatura l'effetto viene smorzato per l'instaurarsi di defomazioni viscosi. Comunque nel range da 0°C a 40°C la fatica esisterà sempre;

4.4.1. I MECCANISMI DI ROTTURA

-"Bottom up":

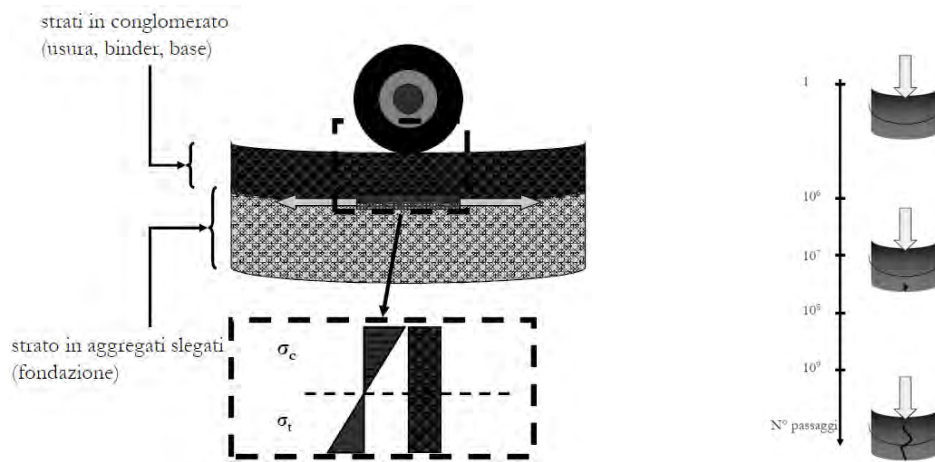


Figura 4.8. Bottom up

Si tratta di un tipo di rottura che nasce alla base degli strati legati e si propaga in superficie per effetto del passaggio ripetuto dei veicoli che causa la flessione ripetuta degli strati. Questa inflessione porta a tensioni e deformazioni che causano le prime fratture per il superamento del limite di resistenza a trazione sopportabile del conglomerato. Il meccanismo illustrato in figura dove vengono rappresentati gli strati in conglomerato bituminoso poggiati in uno strato non legato. Come si vede, l'origine delle fratture è localizzata nell'interfaccia tra lo strato non legato e lo strato bituminoso. La rottura a fatica di tipo bottom-up viene denominata anche a pelle di coccodrillo: la rottura si presenta inizialmente come una breve frattura longitudinale lungo la traiettoria dei pneumatici che poi velocemente si diffonde fino a formare una rete a maglie stratte, un motivo appunto detto a pelle di coccodrillo. Gli elevati stati tensio-deformativi alla base dello strato bituminoso possono essere legati ai seguenti aspetti: spessori troppo piccoli, impiego di conglomerati poco resistenti a trazione, livelli di carico alti connessi ad un'elevata pressione dei pneumatici e presenza di zone più deformabili nei materiali non legati di base o nel sottofondo (inadeguata compattazione), alla risalita di acque capillari, innalzamento della falda e contaminazione della fondazione. Per simulare il caso del "bottom up" si utilizza il modulo complesso tramite il protocollo relativo al travetto.

-“Top Down”:

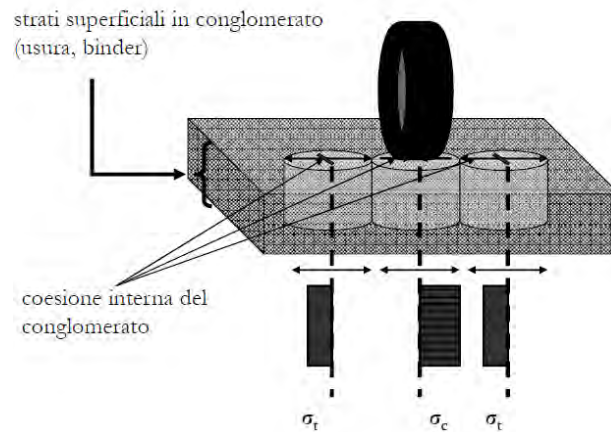


Figura 4.9.Top Down

Si tratta di una fessurazione che inizia in superficie e si propaga verso il basso, si considera quindi ciò che avviene nel piano di contatto ruota-pavimentazione. La parte di pavimentazione a contatto con la ruota è soggetta a compressione, mentre le fibre adiacenti, per coesione del materiale, sono soggette a trazione indiretta. Dopo molti passaggi si ha l'innesco e la propagazione della fessura, che possono essere velocizzati dall'invecchiamento del legante. Il modulo che si può utilizzare per rappresentare questo fenomeno è il modulo di rigidità dell'annesso C.

4.4.2. PROVA A FATICA

L'ITSM (indirect tensile stiffness modulus) è la prova ufficiale standardizzata nell'annesso C della UNI EN 12697-26. Esiste un protocollo gemello che non è normalizzato ma che viene accettato dai ricercatori per fare una prova analoga al controllo di tensione. La prova è denominata ITST (indirect tensile stiffness test). È una prova simile per la determinazione del modulo resiliente americano perché entrambi sono a controllo di carico ma le prove pongono attenzione a 2 istanti differenti. La prova ITST è una procedura di laboratorio con cui si chiede un controllo della tensione orizzontale piuttosto della deformazione. Di conseguenza nasce una deformazione orizzontale che si va a misurare e viene denominata ε_0 . Quest'ultimo è un parametro fondamentale per lo studio della fatica. Qui non vengono più applicati 5 impulsi ma se ne applicano tanti quanti ne servono per portare a rottura il provino.

Ci sono quindi diverse procedure di prova che sono principalmente simili a quelle che si usano per lo studio del modulo di rigidità. I protocolli sono quelli del modulo di rigidità ma c'è un sostanziale differenza. In quest'ultimo si impone un numero determinato di cicli di carico in modo tale da non affaticare il provino mentre nella prova a fatica si applica a priori un numero

imprecisato di cicli tale da rompere il provino. L'incognita nella fatica è appunto il numero di cicli di carico che portano a rompere il provino.

Anche per la fatica, come per il modulo di rigidità, è da capire se si vuole operare con un regime di controllo delle deformazioni o dei carichi perché diverso è l'effetto a causa delle diverse tipologie di carico per poi riscontrare un diverso numero di cicli di carico che si possono applicare a un materiale per portarlo a rottura.

Se per esempio si dovesse operare in controllo di tensione σ , ovvero con un certo carico applicato, la tensione rimarrà costante e per ogni singolo ciclo (quindi per ogni singola martellata) si ha la massima tensione applicata (che infatti rimane costante).

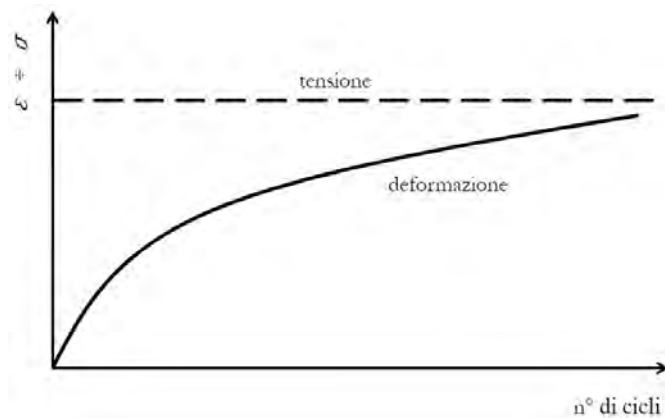


Figura 4.10. Controllo di carico

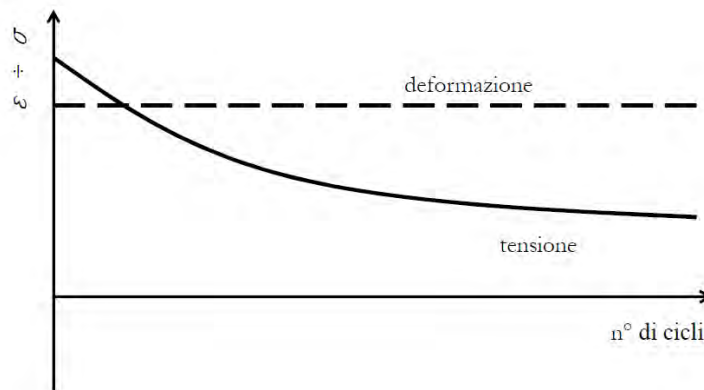


Figura 4.11. Controllo di deformazione

Se il carico continua a ripercuotersi sul provino con una tensione sempre costante, col passare del numero dei cicli il provino si danneggia sempre di più, quindi si nota la curva della deformazione crescere (fig.12).

Se invece si mantiene un controllo delle deformazioni " ε ", ovvero si fissa l'ampiezza della deformazione, accade che, mentre il materiale accumula danno, la rigidità diminuisce perché viene a mancare l'integrità strutturale del materiale. Per mantenere costante " ε ", se il modulo collassa allora anche la tensione diminuisce.

Ci sono quindi delle differenze marcate nei 2 casi al numero di cicli che non è lo stesso. Dipende quindi dall'obiettivo finale infatti il controllo di deformazione e il controllo di tensione non portano agli stessi risultati.

Se si volesse studiare la fatica a temperature medie/basse e se si volesse che la prova non durasse eccessivamente, si consiglierebbe un controllo del carico perché l'accumulo di danno e la propagazione delle fessure è molto più piccolo di quanto non avvenga nel controllo della deformazione. Col controllo della tensione, la “ σ ” è costante e anche se si continua a insistere con i carichi sul materiale, quest'ultimo diverrà sempre più debole subendo sempre la solita tensione. Allora accade che il provino si danneggia più velocemente rispetto al caso del controllo di deformazione. Inoltre nel controllo del carico si ha una minore dispersione dei dati rispetto al controllo di deformazione. Se invece si volesse operare a temperature più elevate allora sarebbe più conveniente un controllo di deformazione.

L'obiettivo resta sempre e comunque ricavare la curva della fatica.

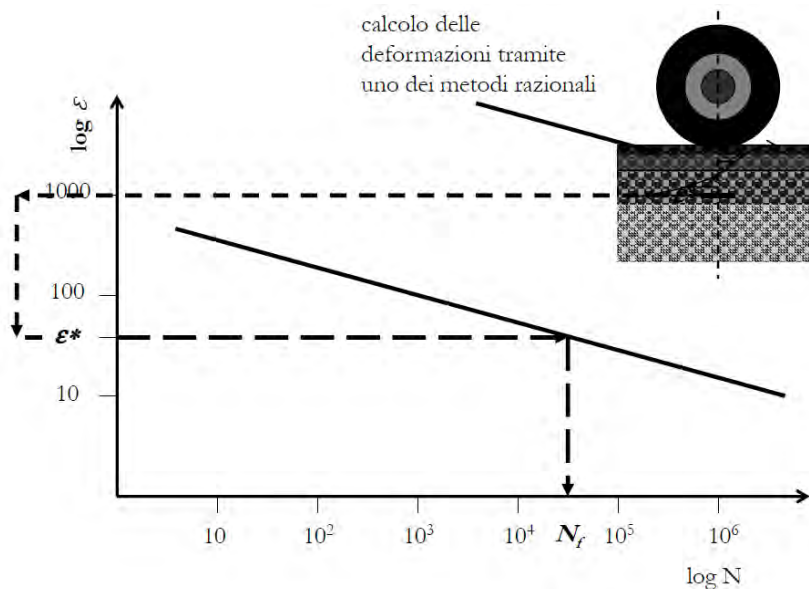


Figura 4.12. Curva della fatica

In figura Figura 4.12, lungo l'ascissa compare il numero dei cicli mentre sull'asse delle ordinate compare la deformazione. Il tutto in scala logaritmica. Lo studio di fatica è un'insieme di prove. Si suppone per esempio di caricare il materiale con un carico di $\sigma=500\text{KPa}$. La tensione è piuttosto elevata (a trazione diretta) al quale corrisponderà una deformazione piuttosto elevata. Poi si avrà bisogno di eseguire la prova con valori di tensione sempre minori. Tendenzialmente si otterranno dei punti dispersi nel quadrante che si potranno linearizzare per ottenere così la curva di fatica. Si parte da 500, 400 e poi 300KPa e questi sono i valori con cui si conduce lo studio a fatica a trazione diretta.

non di deformazione. Dopo di che si linearizza e si ottiene un'espressione pari a:

$$N_f = k_1 \cdot (\varepsilon^*)^{-k_2} \cdot E^{-K_3} \quad (2.17)$$

L'espressione (2.17) della curva di fatica è in funzione di:

-K1, K2, K3: coefficienti di calibrazione sperimentale;

-E: modulo di rigidezza, inserito per indicare che il materiale dipende dalla temperatura ma anche dalla frequenza.

- ε^* : è il valore di deformazione che si ricava con un qualsiasi metodo di calcolo in cui schematizzando la pavimentazione in un multistrato e applicando il carico (la σ) indotta dal passaggio veicolare si chiede di determinare quale è la deformazione nella faccia inferiore dello strato di base per flessione in esercizio.

La prova si arresta quando si arriva a un certo numero di applicazioni del carico in modo tale da ridurre della metà la rigidezza iniziale. Ciò vuol dire che a seconda che ci sia controllo di deformazione o di tensione, si deve ridurre della metà la tensione iniziale o si deve raddoppiare la deformazione iniziale.

4.4.3. INFLUENZA DELLA TEMPERATURA SULLA FATICA

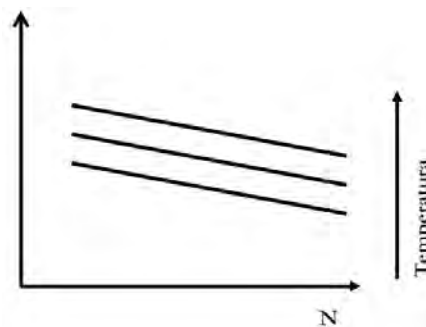


Figura 4.13. Influenza della temperatura

Se cresce la temperatura le curve di fatica traslano verso l'alto.

4.4.4. INFLUENZA DEL TIPO DI BITUME

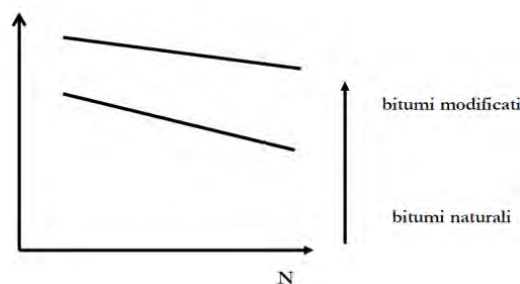


Figura 4.14. Influenza del tipo di bitume

Il bitume standard offre una certa resistenza a fatica ma il modificato rispetto al precedente consente alle curve di traslare verso l'alto e ruotare disponendosi quasi orizzontale: ciò vale a dire che l'effetto del bitume modificato è un netto incremento della vita a fatica.

4.4.5. INFLUENZA DELLA QUANTITÀ DI BITUME

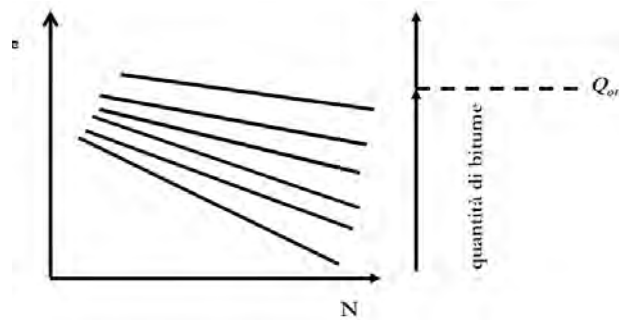


Figura 4.15. Influenza quantità di bitume

In questo caso, più bitume c'è più il materiale resiste a fatica. Se si passa da un contenuto basso di bitume a un quantitativo maggiore, le rette si alzano e ruotano. Esiste poi una soglia oltre la quale il bitume ha un effetto negativo, infatti le curve di fatica tornano ad abbassarsi e a inclinarsi.

Un'altro problema da considerare è il quantitativo ottimo del bitume: se per la fatica lo è, non lo è per l'ormaimento. Molto bitume induce una miscela a essere duttile ovvero capace di resistere a cicli di fatica però molto bitume porta a notevoli scorrimenti viscoplastici. Per diminuire gli scorrimenti viscoplastici bisognerebbe quindi diminuire il quantitativo di bitume, ma poco bitume andrebbe a mettere in crisi la fatica, quindi la relazione ideale è una soluzione di compromesso.

4.4.6. INFLUENZA DEL CONTENUTO DEI VUOTI e AGGREGATI

L'influenza del contenuto varia col tipo di materiale e le modalità con cui viene eseguita la prova. In generale una bassa percentuale di vuoti aumenta la resistenza a fatica del conglomerato. E' anche vero che un'eccessiva riduzione della percentuale dei vuoti (miscele troppo chiuse) porta a una riduzione della resistenza a fatica. Gli aggregati sono importanti ma non in particolar modo sulla resistenza a fatica del conglomerato bituminoso. Solo la loro compattezza e l'adesione del bitume al materiale inerte hanno effetti sulla resistenza a fatica. È chiaro che se l'aggregato è molto spigoloso e scabro piuttosto che arrotondato, il bitume riuscirà ad aderire più efficacemente.

4.4.7. LIMITI TEST DI FATICA IN LABORATORIO

In laboratorio i provini sono sottoposti a sollecitazioni sinusoidali con valori costanti di σ_{max} e σ_{min} mentre sulla sovrastruttura carrabile le sollecitazioni sono distribuite con legge del tutto casuale, sia come valore del carico che come frequenza. Nelle prove il materiale è sollecitato sempre nello stesso punto, mentre sulla strada i carichi sono distribuiti nell'ambito della corsia. In laboratorio poi non si tiene conto delle variazioni termiche e dell'invecchiamento naturale del materiale. Non viene debitamente considerato il fenomeno della autoriparazione, legato alle proprietà viscoso del materiale.

4.5. DEFORMAZIONI PERMANENTI : ORMAIAMENTO

È il secondo meccanismo di rottura: è un ammaloramento caratterizzato dalla formazione di ormaie ovvero depressioni longitudinali (punzonamenti della pavimentazione) sul piano viabile accompagnate da sollevamenti ai lati. Quello che si forma al passaggio ripetuto dei veicoli è un progressivo addensamento al di sotto dello strato e un refluimento ai lati. Ecco che si formano le così dette ormaie. La causa principale è il continuo passaggio di veicoli quindi il traffico. Ad una temperatura di 40°C non si parla più di accumulo di danno ma di accumulo di deformazioni viscoplastiche permanenti non recuperabili. In questo caso è dominante lo scheletro litico anche se incide moltissimo il tipo di bitume. Per riuscire a contrastare questo effetto si deve avere un basso contenuto di bitume, ovvero il contrario della fatica.

4.5.1. FASI DI ACCUMULO DI DEFORMAZIONI PERMANENTI

I fase : è sostanzialmente una deformazione verticale; è la prima fase del creep cioè quando la pavimentazione ha un consolidamento uniforme e un cedimento Δh pressoché costante. Quello che mette in gioco l'ormaimento è la variazione di volume (si riduce il volume perché si saturano i vuoti) ma la forma è la stessa perché il piano è indeformabile. Questo si traduce in un addensamento delle miscele dovuto a un'ulteriore costipamento prodotto dal traffico veicolare;

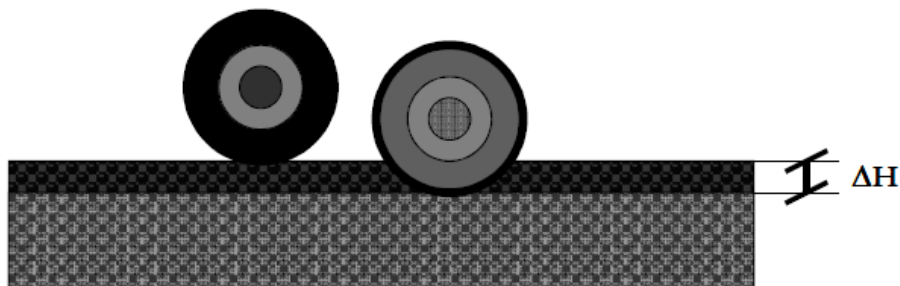


Figura 4.16. Addensamento miscela

II fase: è lo scorrimento di un materiale all'interno degli strati: il volume varia perché i vuoti si saturano e quando lo spazio diventa insufficiente, gli aggregati cominciano ad accavallarsi l'uno con l'altro. In questa fase non c'è più una variazione di volume bensì il volume rimane costante, cede il terreno sotto alle ruote e refluisce sui lati.

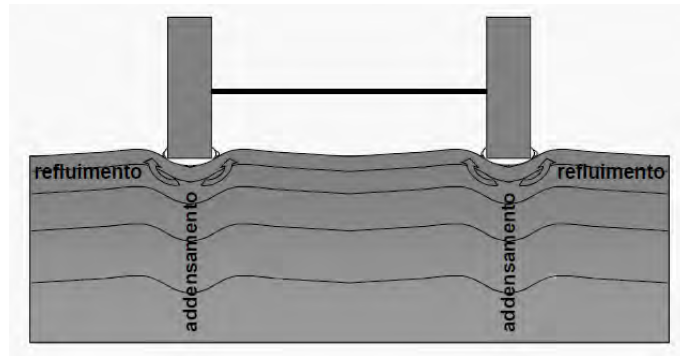


Figura 4.17. Refluimento del bitume ai lati

Quindi quando la sezione è saturata ovvero non ci sono più vuoti ci sono questi scorrimenti reciproci dei grani con l'addensamento sotto e refluimento ai lati.

4.5.2. TIPOLOGIE DI COLLASSO

Il collasso per formazione di ormaie può essere di due tipologie:

-deformazioni permanenti accumulate negli strati non legati a causa di tensioni ripetute troppo elevate negli strati inferiori. Questo è un'ormaiamento non dovuto a scorrimenti viscoplastici o per la scarsa qualità del conglomerato. La causa è che il sottofondo ha scarsa resistenza oppure perché lo strato è troppo sottile e quindi non sufficiente per ridurre le tensioni negli strati inferiori. Si inducono quindi tensioni troppo grandi sul sottofondo tali che portano al punzonamento del sottofondo. Quindi il sottofondo cede se vengono trasmesse tensioni troppo elevate e la pavimentazione non le filtra. Allora è interessata al cedimento solamente la porzione di pavimentazione sotto al carico imposto (ovvero la ruota in questo caso) e non ci sono refluimenti perché il conglomerato non ha problemi.

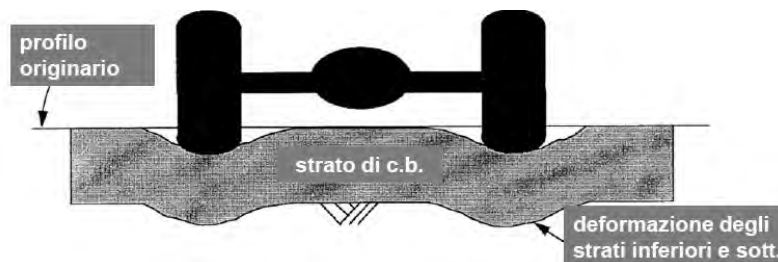


Figura 4.18. Problemi se gli strati sono troppo sottili

Per evitare la formazione di ormaie prodotte dalla plasticizzazione dei materiali sciolti, si può verificare che la tensione verticale tra gli strati legati e non legati sia minore della seguente formula:

$$\sigma_z \leq \frac{0.006 \cdot E_d}{1 + 0.7 \cdot \lg N} \quad (4.16)$$

dove E_d è il modulo dinamico del sottofondo mentre “N” è il numero dei cicli di carico che transitano. Si deve anche verificare che negli strati non legati dalla pavimentazione (quindi a metà dello spessore della fondazione) la tensione sia:

$$\sigma_z \leq 2 \div 4 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \quad (4.17)$$

-deformazioni permanenti accumulati negli strati di conglomerato bituminoso. È un problema di qualità di quest’ultimo: la miscela possiede una scarsa resistenza al taglio specialmente alle alte temperature.

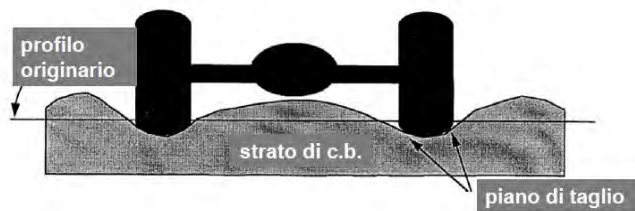


Figura 4.19. Problemi dovuti alla scarsa qualità del bitume

Dalla geotecnica, la resistenza al taglio si determina tramite la seguente relazione:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \theta \quad (4.18)$$

Dove τ dipende dai componenti della miscela bituminosa:

“c” è un termine coesivo ed è fornito col bitume;

“ θ ” è l’angolo di attrito interno dello scheletro litico.

Quindi si hanno due contributi: lo schema litico ovvero “ θ ” e la coesione “c”. Il tutto si traduce nei piani σ e τ .

4.5.3. INFLUENZA DEL BITUME

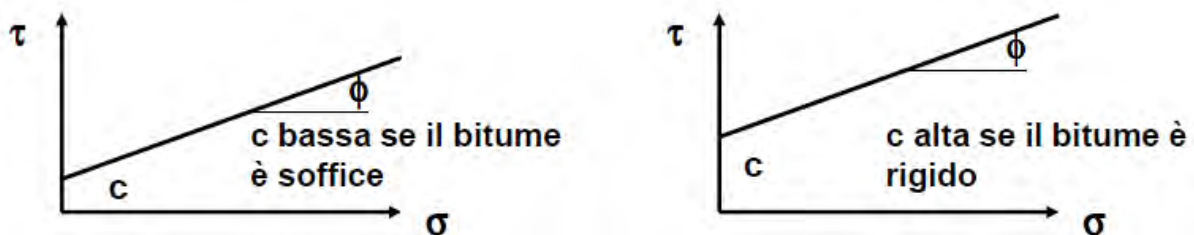


Figura 4.20. Influenza bitume

Se si dovesse mantenere lo stesso schema litico, la pendenza θ non cambia. Ma se si avesse un bitume tenero quindi ad elevata penetrazione e un bitume duro, bassa penetrazione, l’unica differenza che si riscontra sarebbe la coesione “c”. Maggiore è la durezza del bitume, maggiore sarà la coesione. Quindi per ridurre l’ormaiamento occorrerebbe utilizzare un bitume più rigido.

4.5.4. INFLUENZA DEGLI AGGREGATI

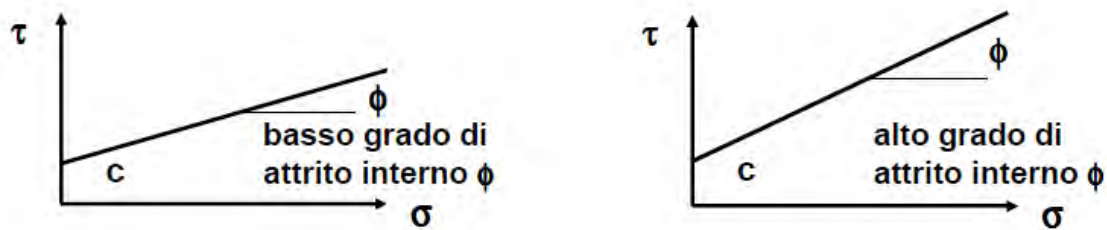


Figura.4.21. Influenza aggregati

Variando la tipologia di aggregato, mantenendo la stessa tipologia di bitume, se si passa da un aggregato liscio con spigoli arrotondati (che ha un certo θ) a una tipologia di aggregato più spigoloso e scabroso, si ottiene un θ maggiore. Allora la retta ruota e si inclina sempre più mettendo in gioco una resistenza al taglio maggiore. Quindi, per ridurre l'ormaiamento occorre utilizzare aggregati spigolosi, con superficie scabra e con granulometria continua.

4.5.5. ESECUZIONE PROVA CREEP STATICO

L'apparecchiatura utilizzata allo scopo è stata una pressa dinamica della Cooper Research Technology attraverso la quale si possono condurre diverse prove standardizzate di cui quella del creep statico. Con questa prova, un provino di conglomerato bituminoso viene sottoposto ad una pressione costante applicata lungo una sola direzione. Si tratta dunque di una prova monoassiale. Per studiare il problema dell'ormaiamento ci si appoggia a prove in laboratorio quindi a prove di creep in cui non si è interessati al modulo di rigidità ma piuttosto al valore della deformazione ϵ . Durante l'applicazione del carico, si registrano gli abbassamenti che il provino subisce nel tempo per effetto del carico stesso. Tale prova ha lo scopo di mettere in risalto il comportamento reologico del materiale ed in particolare le sue caratteristiche viscosive.

L'apparecchiatura di prova è composta da una base sulla quale viene appoggiato il provino e da un piatto superiore dove viene applicato il carico. Questo viene sviluppato mediante un sistema pneumatico controllato attraverso un software che determina le modalità di applicazione del carico, il valore del carico, nonché il tempo di applicazione e di acquisizione dei dati. È possibile inoltre studiare non solo la parte in cui il provino viene caricato ma anche la fase di scarico in cui è possibile mettere in evidenza il modo in cui il materiale restituisce le deformazioni subite. Infine va osservato che l'intera apparecchiatura di prova è inserita all'interno di una cella frigorifera con la quale è dunque possibile controllare la temperatura di svolgimento della prova.

Tale aspetto risulta particolarmente importante soprattutto per le miscele bituminose le quali manifestano delle caratteristiche meccaniche che sono fortemente dipendenti dalla temperatura. Si osservi inoltre che la prova come già indicato si svolge a pressione costante ($\sigma = \text{cost}$). Tale fatto permette di esplicitare, invece della deformazione unitaria, la variazione del modulo di rigidezza $E(t)$ nel tempo.

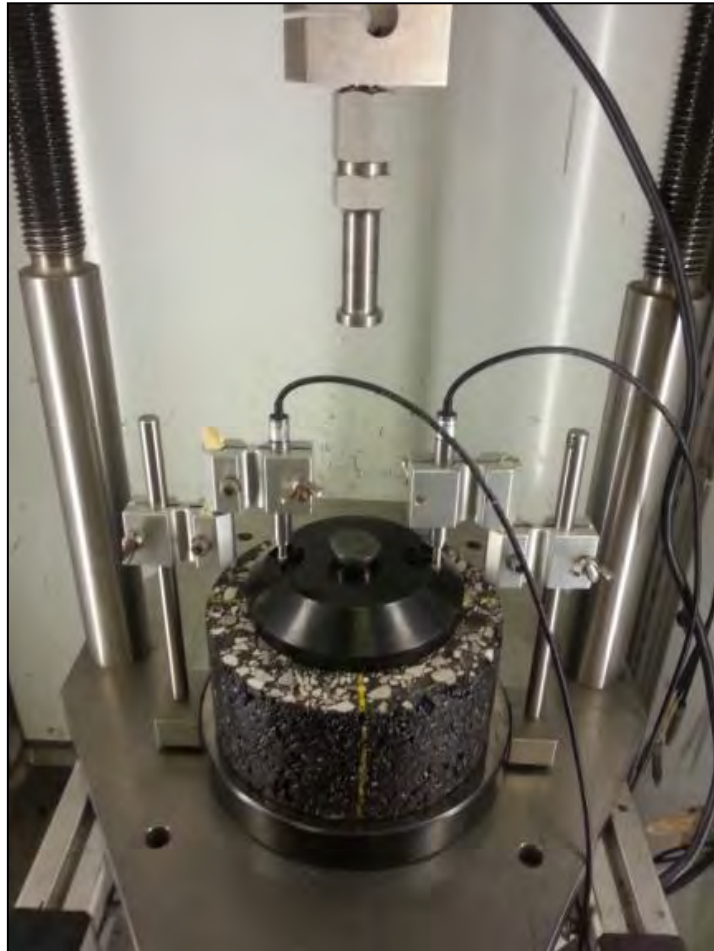


Figura 4.22. Posizionamento del provino per la prova di creep

Il protocollo standard per il creep statico consiste nell'applicare al provino in un primo momento una tensione costante di 100KPa per 60 minuti e in un secondo momento scaricarlo per altri 60minuti. Tutto ciò a 40°C. A questo punto è possibile registrare la deformazione. Tutto avviene per analizzare la capacità dei materiali bituminosi di recuperare parte della deformazione quando viene tolto il carico. Il bitume, essendo visco-elastico, è in grado di recuperare parte della deformazione quando non subisce più il peso del carico.

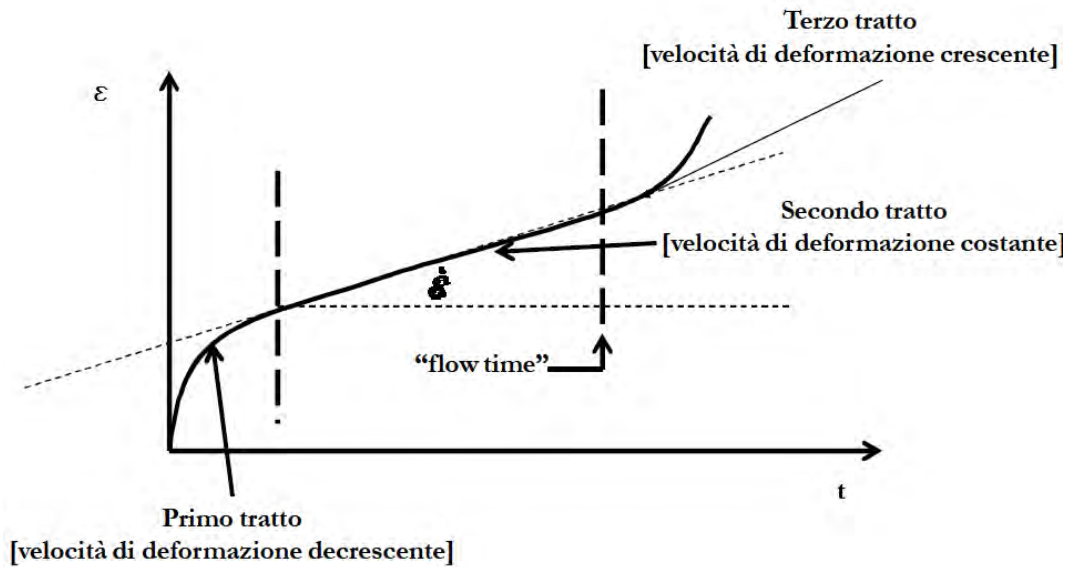


Figura. 4.23. Grafico ϵ -t

Fintanto si applica il carico si osserva come la deformazione tende a salire anche se la tensione sia costante. Tanto maggiore sarà il tempo di applicazione, tanto maggiore sarà la deformazione che si svilupperà anche se la tensione applicata sarà costante. Da prendere anche in considerazione è la temperatura con cui si esegue la prova. Tendenzialmente si assume una temperatura di 40°C ma, essendo il bitume suscettibile alla variazione di quest'ultima, le deformazioni tenderanno ad aumentare ad un incremento della temperatura.

Si osserva lo scarico perché rispetto a una deformazione massima di picco oltre a un recupero istantaneo, ho anche un recupero differito nel tempo. Il materiale recupera parte della deformazione quindi rimarrà una deformazione permanente.

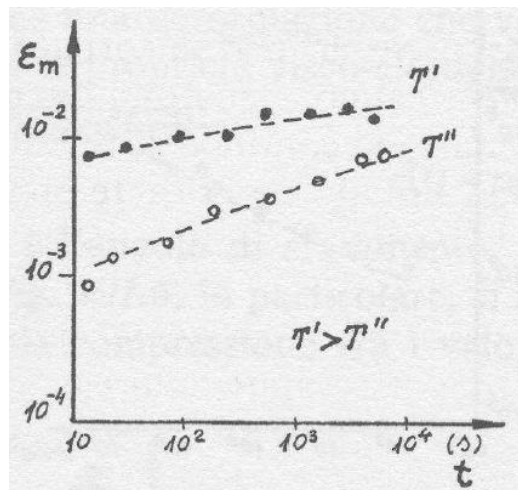


Figura. 4.24. Variazione deformazione alla variazione della temperatura

In Figura. 4.24 viene rappresentato un aspetto della reologia dei conglomerati bituminosi ovvero la sua dipendenza al tempo di applicazione del carico a seconda della temperatura di esercizio. Quest'ultimo grafico è un prova di "creep recovery" ovvero carico e scarico.

Il grafico di Figura. 4.23, a differenza di quello di Figura. 4.24, differisce perché si è prolungato l'orizzonte di carico ovvero si è prolungato il tempo di applicazione del carico per un tempo sufficientemente lungo a partire dalla terza fase. Da questo si denota come la curva della deformazione della prova di creep si suddivida in 3 fasi:

1. Si osserva come la tangente alla curva di pendenza $\dot{\varepsilon}$ si quasi verticale nelle prime fasi per puoi ruotare quindi una fase di rallentamento della deformazione.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\alpha \varepsilon}{\alpha t} \quad (4.19)$$

2. La seconda fase è caratterizzata da un tratto lineare comune in tutti i conglomerati bituminosi. In questo tratto la pendenza della curva è costante ovvero l'accumulo della deformazione nel tempo è costante e lineare.

Quello che si vuole generalmente progettare è un materiale che abbia la pendenza della seconda fase la più bassa possibile quindi tendente all'orizzontale. Quindi oltre alla progettazione della curva granulometrica e al quantitativo del bitume, bisogna cercare di progettare un materiale che abbia una fase 2 più lunga possibile in modo tale d'avere una buona resistenza alle deformazioni permanenti.

3. Quando termina la fase 2 si entra in fase 3 ovvero il momento in cui il materiale tende a non avere più resistenza. Questa fase è caratterizzata da un pendenza della deformazione piuttosto elevata rispetto alle fasi precedenti. Questa fase condurrà in un primo momento a rotture localizzate nel provino ovvero un distacco tra inerte e legante per poi regredire coinvolgendo tutto lo spessore del provino. È tendenziale considerare la fase 2 come la fase ultima alla resistenza del provino ai carichi esterni applicati. Da notare che il protocollo evidenziato presuppone un carico di 100KPa, che sono nettamente inferiori ai 700-800KPa di quelli reali. Questo sta a significare come il provino, durante la determinazione del creep statico, non entrerà mai in fase 3.

In generale ciò che invece si usa indicare è l'inverso del modulo elastico ovvero la creep compliance $J(t)$, il quale è direttamente proporzionale alle deformazioni $\varepsilon(t)$ ed inversamente proporzionale alla pressione, perciò:

$$J(t) = \frac{1}{E(t)} = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \quad (4.20)$$

dove σ è una sollecitazione statica monoassiale applicata, mentre $\varepsilon(t)$ è una deformazione unitaria all'istante t . Quindi la funzione di creep rappresenta la “deformazione unitaria” nel tempo per unità di sforzo applicato.

Nei risultati della prova di creep statico è possibile distinguere i vari aspetti del comportamento reologico del materiale:

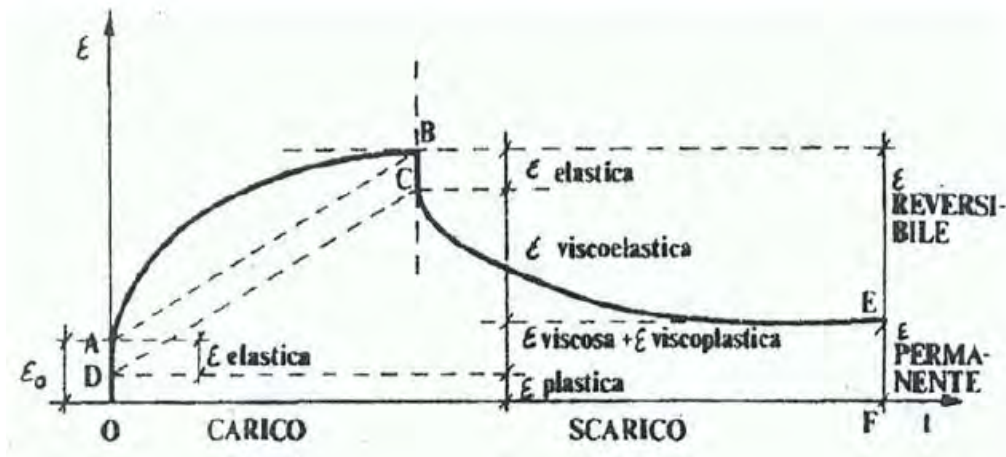


Figura.4.25. Funzione di creep

La deformazione quindi la posso decomporre in 4 termini:

$$\varepsilon_{TOT} = \varepsilon_{eli} + \varepsilon_{pli} + \varepsilon_{ve(t)} + \varepsilon_{vp(t)} \quad (4.21)$$

ε_{eli} : deformazione istantanea. Si carica il materiale e subito si sviluppa una deformazione elastica in corrispondenza dell'applicazione del carico ed è l'unica deformazione che poi si può recuperare istantaneamente;

ε_{pli} : deformazione plastica istantanea. Quando si supera la tensione di snervamento si entra in campo plastico e non più elastico come nel caso precedente e quindi entra in gioco, oltre alla deformazione elastica, anche quella plastica istantanea.

$\varepsilon_{ve(t)}$ e $\varepsilon_{vp(t)}$: deformazione visco elastica e visco plastica . Nel tempo si sviluppa una deformazione che è la somma tra quella viscoelastica e viscoplastica tanto maggiore tanto quanto maggiore è il tempo “t”. Quando invece si va a scaricare si recupera solamente la ε elastica. Se si scarica per un tempo pari a 3 volte il tempo di carico allora si recupera tutta la miscela elastica e rimane solamente la deformazione ε permanente ovvero pari a :

$$\varepsilon_{permanente} = \varepsilon_{pli} + \varepsilon_{vp(t)} \quad (4.22)$$

Quindi la deformazione permanente è definita da una deformazione plastica istantanea che all'inizio non si recupera e da una deformazione viscoplastica non recuperabile.

Se si dovesse considerare invece un travetto francese e applicare una coppia, non cambia nulla se quella coppia è costante rispetto allo schiacciamento del creep. Se si dovesse applicare una coppia costante nel tempo ne si ricava una risposta che è sempre quella.

4.5.6. ESECUZIONE PROVA CREEP DINAMICO

Se si dovesse applicare una serie di cicli di carico si accumulano delle deformazioni permanenti perché è vero che si può scaricare una quota di deformazione ma ne rimane sempre una quota di deformazione che non si può recuperare. La prova di creep dinamico, eseguita sempre con l'attrezzatura dinamica Cooper, permette di simulare il passaggio continuo dei veicoli caricando per un secondo e scaricando sempre per un secondo per 3600 volte come nei protocolli. Questo tipo di test permette di valutare le deformazioni permanenti indotte da cicli di carico ad alte temperature nel materiale. Solitamente la temperatura di condizionamento ed esercizio è di 40°C. L'effetto che si ottiene è la somma di onde di carico dove una quota si recupera e una quota non si recupera.

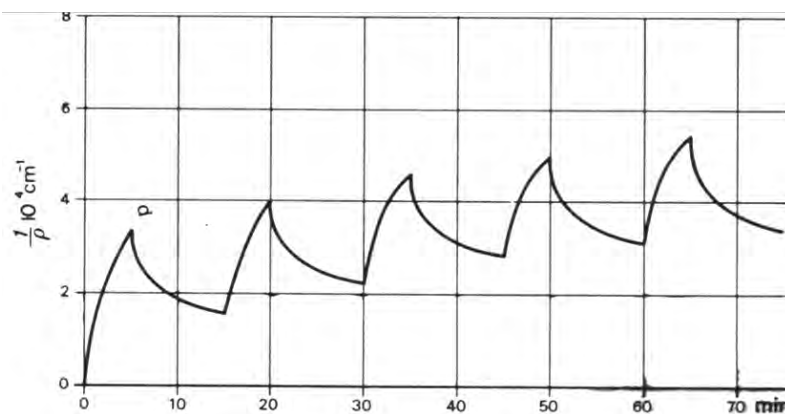


Fig. 4.26. Creep dinamico

Quello che preoccupa è la quota di deformazione permanente che si recupera che è via via sempre crescente tanto che, se alla fine si considera un involuppo inferiore delle deformazioni permanenti, quello che si ottiene è una curva di involuppo delle deformazioni che eguaglia quella del creep statico (la fenomenologia del comportamento del materiale è la stessa). Se si aumentano i cicli di carico aumentano le deformazioni (nel creep statico per aumentare la deformazione si aumentava il tempo di applicazione del carico). L'effetto quindi è sempre lo stesso.

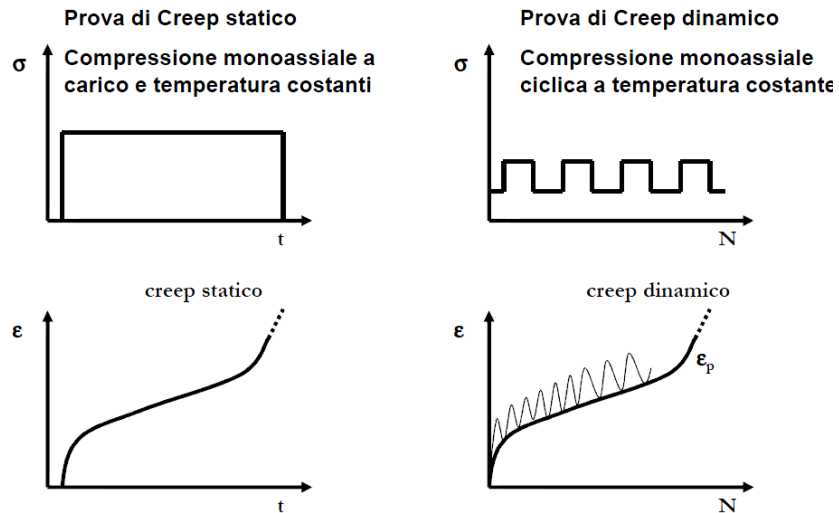


Fig. 4.27. Effetto creep statico/dinamico

Che sia creep statico o che sia la somma dell'effetto delle deformazioni permanenti nel creep dinamico l'effetto è sempre lo stesso. Se quindi il carico è ciclico, l'obiettivo è quello di garficare rispetto al numero di impulsi la deformazione e poi, per calcolare una defromazione per un numero di impulsi diverso da quelli utilizzati in laboratorio si osserva come anche le curve cicliche presentano una fase lineare in cui focalizzare l'attenzione.

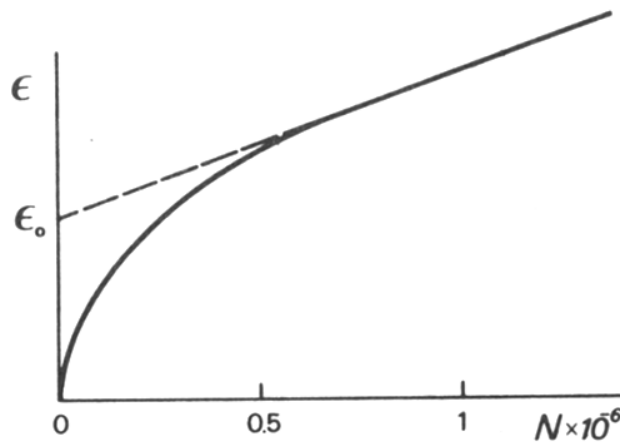


Fig. 4.28. Creep dinamico

$$\varepsilon_N = \varepsilon_0 + \varepsilon^* \cdot N \quad (4.23)$$

in cui ε_0 lo si ricava per estrapolazione, N è il numero di cicli e ε^* è la pendenza della retta.

Parte II:

Sezione sperimentale

5.PROGRAMMA SPERIMENTALE

5.1. MISCELE

Lo studio in laboratorio prevede lo studio e analisi del comportamento meccanico di 2 differenti miscele:

- Conglomerato bituminoso tiepido (confezionato con calcare) – WL_warm limestone;
- Conglomerato bituminoso tiepido contenente scorie d'acciaieria – WS_warm slag.

Queste due miscele sono state confezionate tramite l'aggiunta di additivo chimico una volta raggiunta la temperatura di fusione del bitume. Il bitume preso in esame è un 50/70. Una volta riscaldato in forno fino a una temperatura di 180°C per portarlo a uno stato sufficientemente liquido, è stato additivato con una percentuale pari allo 0,5% sul peso del bitume. Sono serviti circa 5 minuti di miscelazione in modo tale che l'additivo si mescolasse perfettamente col bitume evitando così eventuali formazioni di bolle d'aria e grumi.

Per quanto riguarda la scelta degli aggregati ci si è indirizzati all'uso di scoria d'acciaieria (EAF) e calcare. La comparazione meccanica tra provini confezionati o con scorie o con calcare è perché le scorie presentano notevoli vantaggi ambientali ed evitano l'estrazione di nuovi aggregati di origine naturale e quindi riducono il volume di materiali conferiti in discarica.

Il mix design invece di entrambe le miscele è stato studiato in modo tale d'assumere come riferimento la classica sovrastruttura stradale flessibile diffusamente impiegata nel territorio italiano. Il pacchetto stradale di questa struttura è costituito da, a partire dal sottofondo, strato di fondazione e base per poi salire verso la superficie, in ordine, ovvero lo strato di collegamento e per ultimo, a contatto col traffico veicolare, lo strato d'usura.

5.2. TEMPERATURA DI PRODUZIONE

Per quanto riguarda la temperatura di produzione delle miscele è stato deciso di assumere per entrambe le stesse scelte progettuali, ovvero:

- Temperatura di miscelazione : 130°C;
- Temperatura di compattazione : 110°C.

5.3. CONFEZIONAMENTO PROVINI

Il numero di provini prodotti per lo sviluppo dell'elaborato consiste di compattare un numero pari a 4 provini per miscela tramite la Pressa Giratoria.

Le fustelle per tale macchinario permettono di produrre provini di diametro di 150mm e un'altezza pari a circa 130mm. Si ottengono quindi 2 campioni cilindrici di altezza pari a circa 60cm una volta tagliati con sega elettrica.

Quindi in totale si sono ottenuti:

- 8 provini da circa 60cm d'altezza di conglomerato bituminoso tiepido confezionato con calcare WL_110;
- 8 provini da circa 60cm d'altezza di conglomerato bituminoso tiepido confezionato con scorie WS_110.

5.4. CARATTERIZZAZIONE PRESTAZIONALE

Verranno eseguite diverse prove di tipo prestazionale per caratterizzare le differenze dalle 2 tipologie di miscele. Le prove saranno:

- **COMPATTIBILITÀ** (curve di compattazione con pressa giratoria)
4 curve di compattazione;
- **INDICE DEI VUOTI**
8 indici dei vuoti per miscela;
- **RIGIDEZZA** (prove di modulo a trazione indiretta – BS DS 213)
[T = 20 °C; diametro = 150 mm; altezza ≈ 60 mm; rise time = 124 ms; deformazione = 5 μm]
8 ripetizioni per miscela;
- **DEFORMAZIONI PERMANENTI** (prova di compressione ciclica – EN 12697-25/A)
[T = 40 °C; diametro = 150 mm; altezza ≈ 60 mm; onda quadra; f = 0.5 Hz; stress = 100 kPa]
3 ripetizioni per miscela;
- **RESISTENZA FATICA** (prova di fatica a trazione indiretta – BS DD ABF)
[T = 20 °C; diametro = 150 mm; altezza ≈ 60 mm; rise time = 124 ms; pulserepetition = 1.5 s]
5 ripetizioni per miscela.

5.5. NOMENCLATURA PROVINI

In laboratorio, i provini sono stati nominati per la distinzione l'uno dall'altro nel seguente modo:

XYZZZ_nM

dove

X = H (per le miscele HMA) oppure W (per le miscele WMA)

Y = L (per le miscele confezionate con calcare) oppure S (per le miscele con scorie)

ZZZ = 110 (temperatura di compattazione 110 °C)

n = 1, 2, 3 o 4 (numero del provino per una data miscela)

M = A (per la metà superiore del provino giratoria) oppure B (per la metà inferiore)



Figura 5.1 | 16 provini suddivisi nelle 2 differenti miscele

6. CARATTERIZZAZIONE DEGLI AGGREGATI

Primo passo è stato lo studio degli aggregati da inserire nella miscela bituminosa. Per caratterizzarli è stato necessario eseguire una serie di prove. Gli aggregati scelti per lo studio in esame sono stati i seguenti:

- Calcare 0/4
- Calcare 4/8
- Calcare 8/12
- Calcare 12/20
- Scorie 0/4
- Scorie 4/8
- Scorie 8/12
- Filler

Per un'adeguata comparazione sarebbe stato opportuno prendere in considerazione anche la scoria 12/20 ma a causa della scarsa domanda del mercato si è dovuta rimpiazzarla col pietrisco 12/20.

6.1. CURVE GRANULOMETRICHE

Sono stati setacciati ogni singola pezzatura di aggregato col fine di determinare la curva granulometrica, indispensabile poi per lo studio del mix design. La norma a cui si è fatto riferimento è la CNR 23 relativa all'analisi granulometrica di una terra.

- CALCARE 0/4:

Tipo	Apertura maglie [mm]	Peso trattenuto [g]	% trattenuto	Somma trattenuto [g]	Passante [g]	% passante	Passante
Setaccio	31,5	0,0	0,0%	0,0	914,0	100,0%	1,000
Setaccio	20	0,0	0,0%	0,0	914,0	100,0%	1,000
Setaccio	14	0,0	0,0%	0,0	914,0	100,0%	1,000
Setaccio	10	0,0	0,0%	0,0	914,0	100,0%	1,000
Setaccio	6,3	0,0	0,0%	0,0	914,0	100,0%	1,000
Setaccio	2	341,0	37,3%	341,0	573,0	62,7%	0,627
Setaccio	0,5	267,0	29,2%	608,0	306,0	33,5%	0,335
Setaccio	0,25	73,0	8,0%	681,0	233,0	25,5%	0,255
Setaccio	0,063	98,0	10,7%	779,0	135,0	14,8%	0,148
- fondo		135,0	14,8%	914,0	0,0	0,0%	0,000
Totale		914,0					

Tabella 6.1 Setacciatura calcare 0/4

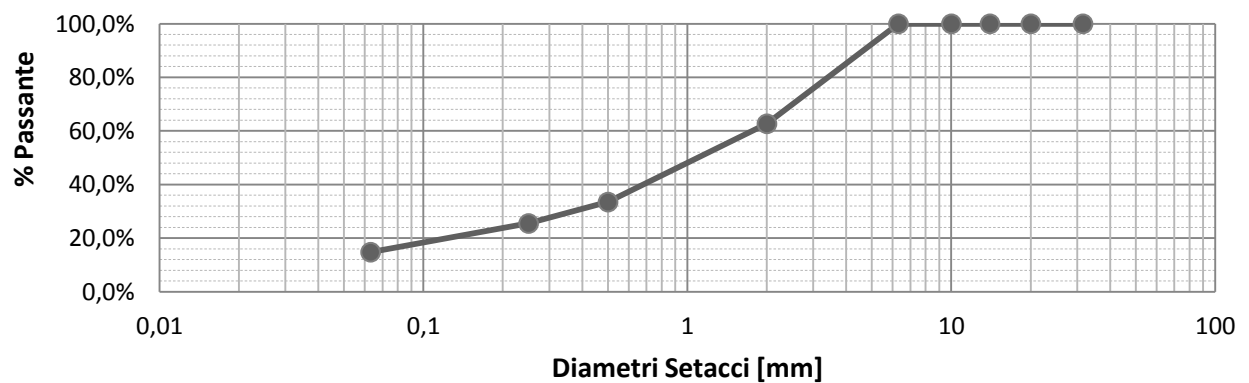


Tabella 6.2. Curva granulometrica calcare 0/4

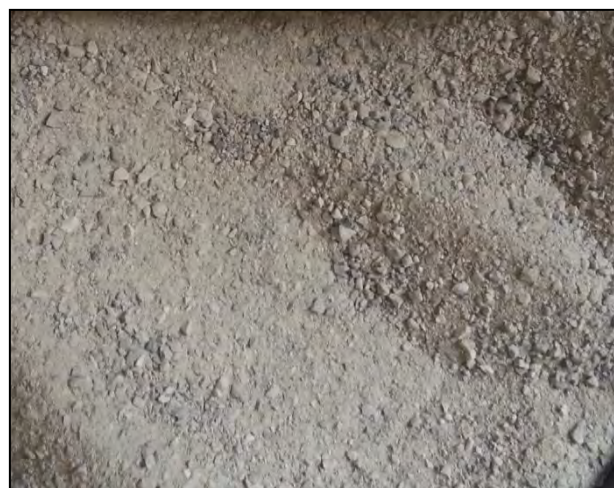


Figura 6.1. Calcare 0/4

- CALCARE 4/8:

Tipo	Apertura maglie [mm]	Peso trattenuto [g]	% trattenuto	Somma trattenuto [g]	Passante [g]	% passante	Passante
Setaccio	31,5	0,0	0,0%	0,0	982,0	100,0%	1,000
Setaccio	20	0,0	0,0%	0,0	982,0	100,0%	1,000
Setaccio	14	0,0	0,0%	0,0	982,0	100,0%	1,000
Setaccio	10	26,0	2,6%	26,0	956,0	97,4%	0,974
Setaccio	6,3	457,0	46,5%	483,0	499,0	50,8%	0,508
Setaccio	2	497,0	50,6%	980,0	2,0	0,2%	0,002
Setaccio	0,5	2,0	0,2%	982,0	0,0	0,0%	0,000
Setaccio	0,25	0,0	0,0%	982,0	0,0	0,0%	0,000
Setaccio	0,063	0,0	0,0%	982,0	0,0	0,0%	0,000
- fondo		0,0	0,0%	982,0	0,0	0,0%	0,000
Totale		982,0					

Tabella 6.3.Setacciatura calcare 4/8

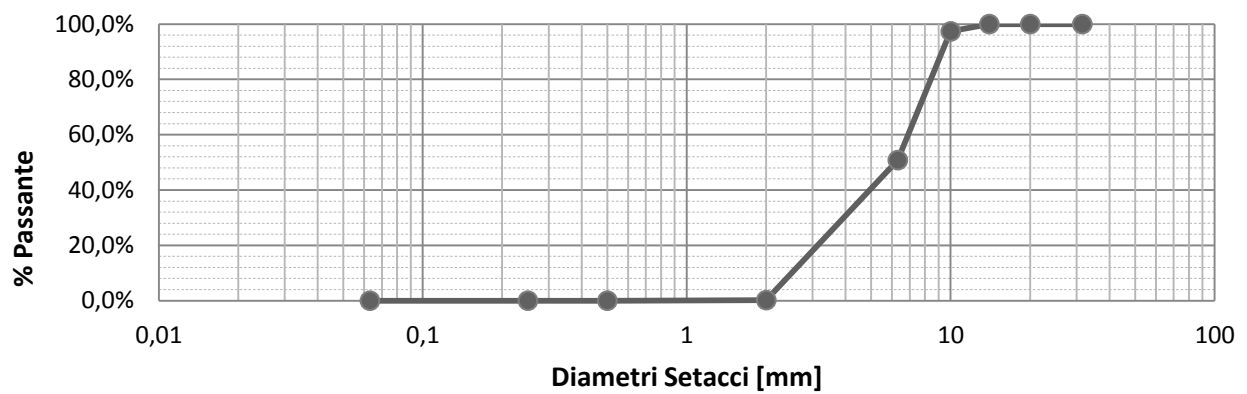


Tabella 6.4.Curva granulometrica calcare 4/8



Figura 6.2.Calcare 4/8

- CALCARE 8/12:

Tipo	Apertura maglie [mm]	Peso trattenuto [g]	% trattenuto	Somma trattenuto [g]	Passante [g]	% passante	Passante
Setaccio	31,5	0,0	0,0%	0,0	906,0	100,0%	1,000
Setaccio	20	0,0	0,0%	0,0	906,0	100,0%	1,000
Setaccio	14	0,0	0,0%	0,0	906,0	100,0%	1,000
Setaccio	10	422,0	46,6%	422,0	484,0	53,4%	0,534
Setaccio	6,3	450,0	49,7%	872,0	34,0	3,8%	0,038
Setaccio	2	34,0	3,8%	906,0	0,0	0,0%	0,000
Setaccio	0,5	0,0	0,0%	906,0	0,0	0,0%	0,000
Setaccio	0,25	0,0	0,0%	906,0	0,0	0,0%	0,000
Setaccio	0,063	0,0	0,0%	906,0	0,0	0,0%	0,000
- fondo		0,0	0,0%	906,0	0,0	0,0%	0,000
Totale		906,0					

Tabella 6.5. Setacciatura calcare 8/12

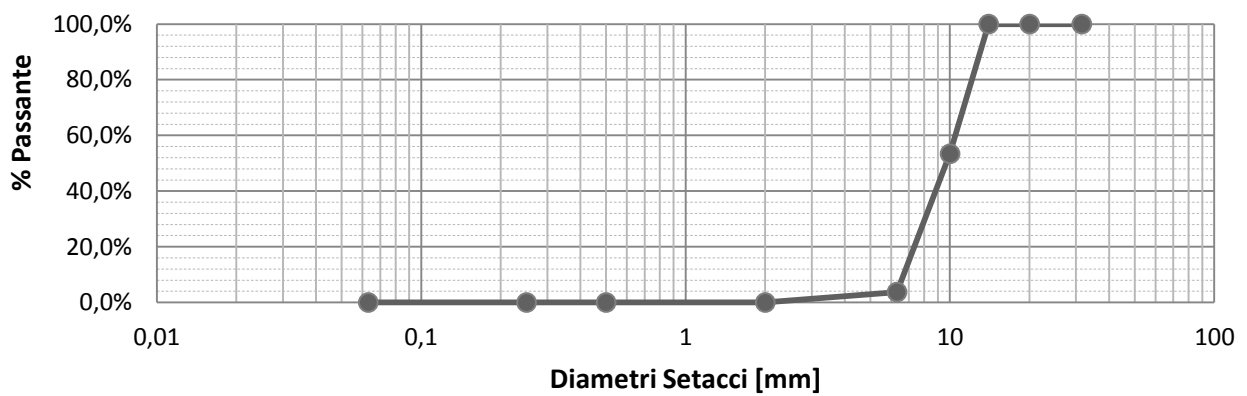


Tabella 6.6. Curva granulometrica calcare 8/12



Figura 6.3. Calcare 8/12

- CALCARE 12/20:

Tipo	Apertura maglie [mm]	Peso trattenuto [g]	% trattenuto	Somma trattenuto [g]	Passante [g]	% passante	Passante
Setaccio	31,5	0,0	0,0%	0,0	1478,0	100,0%	1,000
Setaccio	20	7,0	0,5%	7,0	1471,0	99,5%	0,995
Setaccio	14	1030,0	69,7%	1037,0	441,0	29,8%	0,298
Setaccio	10	424,0	28,7%	1461,0	17,0	1,2%	0,012
Setaccio	6,3	17,0	1,2%	1478,0	0,0	0,0%	0,000
Setaccio	2	0,0	0,0%	1478,0	0,0	0,0%	0,000
Setaccio	0,5	0,0	0,0%	1478,0	0,0	0,0%	0,000
Setaccio	0,25	0,0	0,0%	1478,0	0,0	0,0%	0,000
Setaccio	0,063	0,0	0,0%	1478,0	0,0	0,0%	0,000
- fondo		0,0	0,0%	1478,0	0,0	0,0%	0,000
Totale		1478,0					

Tabella 6.7. Setacciatura calcare 12/20

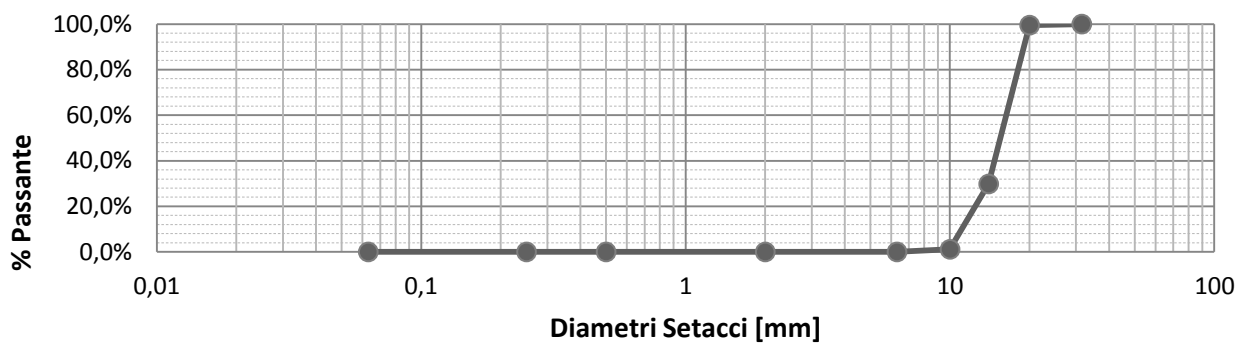


Tabella 6.8. Curva granulometrica calcare 12/20



Figura 6.4. Calcare 12/20

- SCORIA 0/4:

Tipo	Apertura maglie [mm]	Peso trattenuto [g]	% trattenuto	Somma trattenuto [g]	Passante [g]	% passante	Passante
Setaccio	31,5	0,0	0,0%	0,0	500,0	100,0%	1,000
Setaccio	20	0,0	0,0%	0,0	500,0	100,0%	1,000
Setaccio	14	0,0	0,0%	0,0	500,0	100,0%	1,000
Setaccio	10	0,0	0,0%	0,0	500,0	100,0%	1,000
Setaccio	6,3	0,0	0,0%	0,0	500,0	100,0%	1,000
Setaccio	2	153,0	30,6%	153,0	347,0	69,4%	0,694
Setaccio	0,5	205,0	41,0%	358,0	142,0	28,4%	0,284
Setaccio	0,25	48,0	9,6%	406,0	94,0	18,8%	0,188
Setaccio	0,063	45,0	9,0%	451,0	49,0	9,8%	0,098
- fondo		49,0	9,8%	500,0	0,0	0,0%	0,000
Totale		500,0					

Tabella 6.9.Setacciatura scoria 0/4

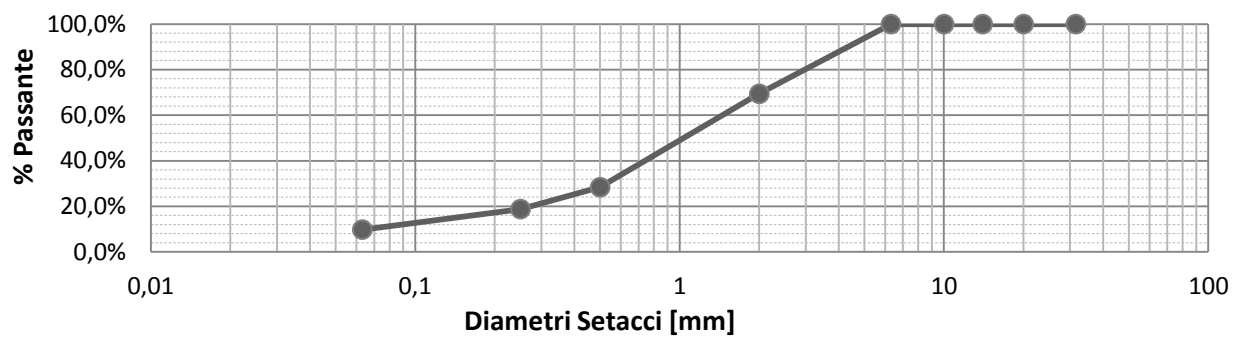


Tabella 6.10.Curva granulometrica scoria 0/4



Figura 6.5.Scoria 0/4

- SCORIA 4/8:

Tipo	Apertura maglie [mm]	Peso trattenuto [g]	% trattenuto	Somma trattenuto [g]	Passante [g]	% passante	Passante
Setaccio	31,5	0,0	0,0%	0,0	1308,0	100,0%	1,000
Setaccio	20	0,0	0,0%	0,0	1308,0	100,0%	1,000
Setaccio	14	0,0	0,0%	0,0	1308,0	100,0%	1,000
Setaccio	10	2,0	0,2%	2,0	1306,0	99,8%	0,998
Setaccio	6,3	407,0	31,1%	409,0	899,0	68,7%	0,687
Setaccio	2	891,0	68,1%	1300,0	8,0	0,6%	0,006
Setaccio	0,5	6,0	0,5%	1306,0	2,0	0,2%	0,002
Setaccio	0,25	0,0	0,0%	1306,0	2,0	0,2%	0,002
Setaccio	0,063	2,0	0,2%	1308,0	0,0	0,0%	0,000
- fondo		0,0	0,0%	1308,0	0,0	0,0%	0,000
Totale		1308,0					

Tabella 6.11.Setacciatura scoria 4/8

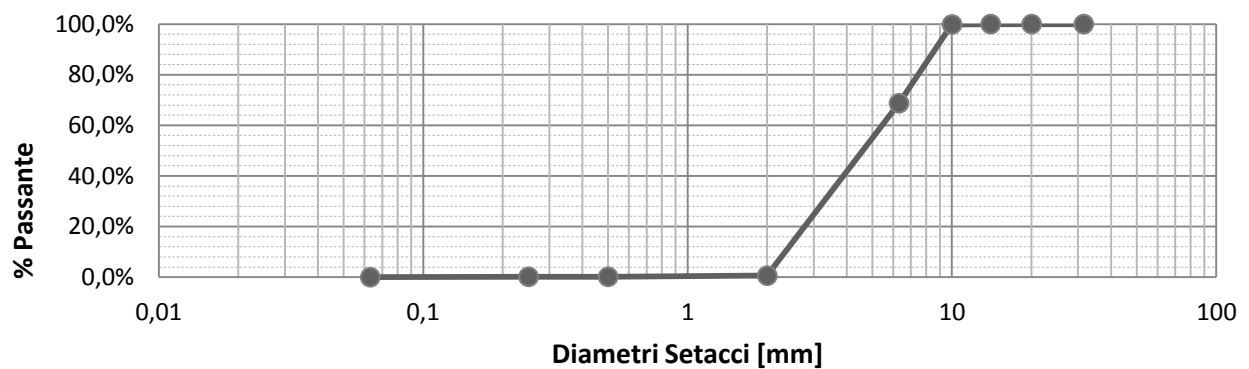


Tabella 6.12.Curva granulometrica scoria 4/8



Figura 6.6.Scoria 4/8

- SCORIA 8/12:

Tipo	Apertura maglie [mm]	Peso trattenuto [g]	% trattenuto	Somma trattenuto [g]	Passante [g]	% passante	Passante
Setaccio	31,5	0,0	0,0%	0,0	1179,0	100,0%	1,000
Setaccio	20	0,0	0,0%	0,0	1179,0	100,0%	1,000
Setaccio	14	20,0	1,7%	20,0	1159,0	98,3%	0,983
Setaccio	10	876,0	74,3%	896,0	283,0	24,0%	0,240
Setaccio	6,3	280,0	23,7%	1176,0	3,0	0,3%	0,003
Setaccio	2	0,0	0,0%	1176,0	3,0	0,3%	0,003
Setaccio	0,5	0,0	0,0%	1176,0	3,0	0,3%	0,003
Setaccio	0,25	0,0	0,0%	1176,0	3,0	0,3%	0,003
Setaccio	0,063	3,0	0,3%	1179,0	0,0	0,0%	0,000
- fondo		0,0	0,0%	1179,0	0,0	0,0%	0,000
Totale		1179,0					

Tabella 6.13.Setacciatura scoria 8/12

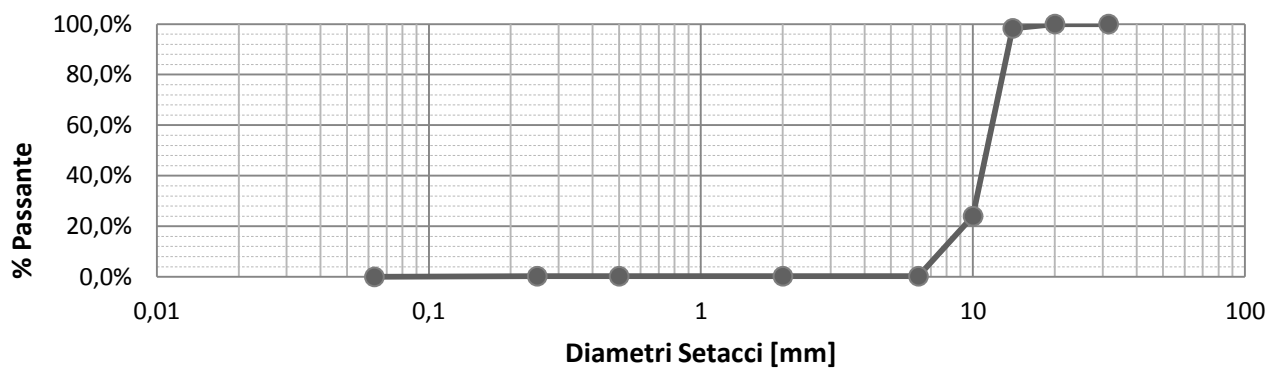


Tabella 6.14.Curva granulometrica scoria 8/12



Figura 6.7.Scoria 8/12

- FILLER:

Tipo	Apertura maglie [mm]	Peso trattenuto [g]	% trattenuto	Somma trattenuto [g]	Passante [g]	% passante	Passante
Setaccio	31,5	0,0	0,0%	0,0	498,8	100,0%	1,000
Setaccio	20	0,0	0,0%	0,0	498,8	100,0%	1,000
Setaccio	14	0,0	0,0%	0,0	498,8	100,0%	1,000
Setaccio	10	0,0	0,0%	0,0	498,8	100,0%	1,000
Setaccio	6,3	0,0	0,0%	0,0	498,8	100,0%	1,000
Setaccio	2	0,0	0,0%	0,0	498,8	100,0%	1,000
Setaccio	0,5	0,0	0,0%	0,0	498,8	100,0%	1,000
Setaccio	0,25	19,953	4,0%	20,0	478,9	96,0%	0,960
Setaccio	0,063	144,162	28,9%	164,1	334,7	67,1%	0,671
- fondo		334,715	67,1%	498,8	0,0	0,0%	0,000
Totale		498,8					

Tabella 6.15.Setacciatura filler

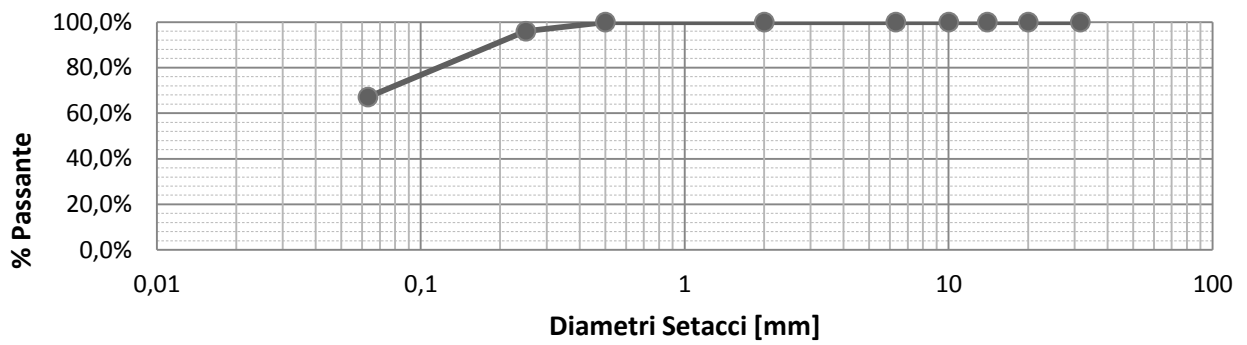


Tabella 6.16.Curva granulometrica filler



Figura 6.8.Filler

6.2. CONFRONTO CARATTERISTICHE PIETRISCO E SCORIE

L'indagine in laboratorio ha permesso di mettere a confronto le caratteristiche meccaniche degli aggregati presi in considerazione. Di seguito vengono riportati i risultati e commenti delle singole prove con riferimento alla relativa norma d'esecuzione.

Le norme a cui si è fatto riferimento sono:

- CNR 27 per la misura dell'equivalente in sabbia;
- CNR 62 per la massa volumica apparente non addensata;
- CNR 63 per la massa volumica apparente;
- CNR 64 per la massa volumica reale;
- CNR 95 per l'indice di forma e l'indice di appiattimento;
- UNI EN 1097-2 per la resistenza alla frammentazione (Los Angeles);
- CNR UNI 10014 per i limiti di Atterberg.

6.2.1. RISULTATI EQUIVALENTE IN SABBIA

La norma di riferimento è la CNR 27. Per vedere la metodologia d'esecuzione e norma fare riferimento al paragrafo 3.7.3 .

CALCARE 0/4		
<i>Valore Medio dell'Equivalente in Sabbia</i>	E.S. [%]	78
<i>1° Valore dell'Equivalente in Sabbia</i>	E.S. [%]	76
Altezza della sospensione (1° misura)	h_1 [cm]	11,0
Spessore dello strato di sabbia (1° misura)	h_2 [cm]	8,4
<i>2° Valore dell'Equivalente in Sabbia</i>	E.S. [%]	81
Altezza della sospensione (2° misura)	h_1 [cm]	10,6
Spessore dello strato di sabbia (2° misura)	h_2 [cm]	8,6
<i>3° Valore dell'Equivalente in Sabbia</i>	E.S. [%]	76
Altezza della sospensione (3° misura)	h_1 [cm]	11,0
Spessore dello strato di sabbia (3° misura)	h_2 [cm]	8,4

Tabella 6.17. Equivalente in sabbia calcare0/4

SCORIE 0/4		
<i>Valore Medio dell'Equivalente in Sabbia</i>	E.S. [%]	92
<i>1° Valore dell'Equivalente in Sabbia</i>	E.S. [%]	89
Altezza della sospensione (1° misura)	h_1 [cm]	10,8
Spessore dello strato di sabbia (1° misura)	h_2 [cm]	9,6
<i>2° Valore dell'Equivalente in Sabbia</i>	E.S. [%]	91
Altezza della sospensione (2° misura)	h_1 [cm]	10,6
Spessore dello strato di sabbia (2° misura)	h_2 [cm]	9,6
<i>3° Valore dell'Equivalente in Sabbia</i>	E.S. [%]	96
Altezza della sospensione (3° misura)	h_1 [cm]	10,0
Spessore dello strato di sabbia (3° misura)	h_2 [cm]	9,6

Tabella 6.18. Equivalente in sabbia scorie 0/4

Commenti:

Dovendo progettare uno strato di usura, come requisito di accettazione per l'ES viene richiesto un valore superiore a 55. Dalle prove eseguite si ottengono valori dell'ES che soddisfano ampiamente il limite minimo imposto. Questi elevati valori sono dettati dal fatto che lo strato di usura, essendo direttamente a contatto col traffico stradale, necessita di una qualità del mix design migliore rispetto a quella degli strati sottostanti; pertanto per un impiego così nobile dell'inerte non deve essere compromessa l'adesione del legante all'aggregato e ciò è possibile evitando un eccesso di filler attivo all'interno della miscela.

In termini numerici tutto ciò si comprende osservando i valori di h_1 e h_2 nella formula sopra riportata: siccome gli elementi puliti si depositano sul fondo ed il fango si dispone superiormente in sospensione, tanto più elevato è lo spessore dello strato di sabbia h_2 , tanto maggiore sarà la pulizia dell'inerte.

Ulteriore osservazione può essere condotta paragonando gli indici conseguiti dalle prove: si nota come i valori ottenuti (78 per il calcare e 92 per le scorie) siano molto elevati; inoltre nel dettaglio le scorie risultano essere più pulite, presentando quindi una minore quantità di materiale organico invece presente nel calcare.

6.2.2. RISULTATI MASSA VOLUMICA APPARENTE DI AGGREGATI NON ADDENSATI

La norma di riferimento è la CNR 62. Per vedere la metologia d'esecuzione e norma fare riferimento al paragrafo 3.7.3.

CALCARE 0/4		
<i>massa volumica apparente non addensata</i>	MVA [g/cm³]	1,69
massa materiale nel contenitore	1 [g]	3497,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	3474,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	3471,0
	Media [g]	3480,7
	Volume recipiente	V [litri] [dm ³]
	Volume recipiente	V [cm ³]
		2,1
		2055,41

CALCARE 4/8		
<i>massa volumica apparente non addensata</i>	MVA [g/cm³]	1,39
massa materiale nel contenitore	1 [g]	2866,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	2827,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	2874,0
	Media [g]	2855,7
	Volume recipiente	V [litri] [dm ³]
	Volume recipiente	V [cm ³]
		2,055
		2055,41

CALCARE 8/12		
<i>massa volumica apparente non addensata</i>	MVA [g/cm³]	1,40
massa materiale nel contenitore	1 [g]	15080,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	14993,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	15118,0
	Media [g]	15063,7
	Volume recipiente	V [litri] [dm ³]
	Volume recipiente	V [cm ³]
		10,782
		10782

CALCARE 12/20		
<i>massa volumica apparente non addensata</i>	MVA [g/cm³]	1,38
massa materiale nel contenitore	1 [g]	14872,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	14910,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	14876,0
	Media [g]	14886,0
	Volume recipiente	V [litri] [dm ³]
	Volume recipiente	V [cm ³]
		10,782
		10782

Tabella 6.19. Massa volumica apparente non addensata calcare

SCORIE 0/4		
<i>massa volumica apparente non addensata</i>	MVA [g/cm³]	2,07
massa materiale nel contenitore	1 [g]	4171,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	4280,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	4288,0
	Media [g]	4246,3
Volume recipiente	V [litri] [dm ³]	2,1
Volume recipiente	V [cm ³]	2055,41

SCORIE 4/8		
<i>massa volumica apparente non addensata</i>	MVA [g/cm³]	1,89
massa materiale nel contenitore	1 [g]	3879,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	3906,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	3900,0
	Media [g]	3895,0
Volume recipiente	V [litri] [dm ³]	2,055
Volume recipiente	V [cm ³]	2055,41

SCORIE 8/12		
<i>massa volumica apparente non addensata</i>	MVA [g/cm³]	1,92
massa materiale nel contenitore	1 [g]	20706,8
massa materiale nel contenitore	2 [g]	20706,8
massa materiale nel contenitore	2 [g]	20706,8
	Media [g]	20706,8
Volume recipiente	V [litri] [dm ³]	10,782
Volume recipiente	V [cm ³]	10782

Tabella 6.20. Massa volumica apparente non addensata scorie

Commenti:

Da come si evince dai risultati, le scorie sono caratterizzate da una massa volumica apparente non addensata superiore a quella del calcare. Questo permette di dedurre come, a parità di volume, le scorie pesino di più. Facendo una media tra i risultati ottenuti dalle varie pezzature degli aggregati, si deduce che:

- La media della massa volumica apparente non addensata del calcare è di 1,47 g/cm³;
- La media della massa volumica apparente non addensata delle scorie è di 1,96 g/cm³.

6.2.3. RISULTATI MASSA VOLUMICA APPARENTE DEI GRANULI DI UN AGGREGATO

La norma di riferimento è la CNR 63. Per vedere la metologia d'esecuzione e norma fare riferimento al paragrafo 3.7.4 .

-Metodo del picnometro:

CALCARE 0/4		
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA_p [g/cm³]	2,76
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	500,0
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	ρ ₁ [g]	1887,0
<i>massa acqua nel picnometro</i>	ρ ₂ [g]	1565,0
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

CALCARE 4/8		
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA_p [g/cm³]	2,75
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	500,0
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	ρ ₁ [g]	1886,6
<i>massa acqua nel picnometro</i>	ρ ₂ [g]	1565,0
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

SCORIE 0/4		
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA_p [g/cm³]	3,80
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	500,0
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	ρ ₁ [g]	1936,0
<i>massa acqua nel picnometro</i>	ρ ₂ [g]	1565,0
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

SCORIE 4/8		
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA_p [g/cm³]	3,89
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	500,0
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	ρ ₁ [g]	1939,0
<i>massa acqua nel picnometro</i>	ρ ₂ [g]	1565,0
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

Tabella 6.21. Metodo picnometro per massa volumica apparente

Metodo della bilancia idrostatica (per materiali completamente trattenuti al crivello da 10mm):

CALCARE 12/20		
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA_{bi} [g/cm³]	2,71
<i>massa materiale essiccato nel cestello</i>	p [g]	2000
<i>massa del materiale e del cestello in acqua</i>	p ₁ [g]	1733
<i>massa del cestello in acqua</i>	p ₂ [g]	457,6
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

Tabella 6.22. Bilancia idrostatica

Entrambi i metodi, per materiali parzialmente passanti al crivelli da 10mm.

CALCARE 8/12			
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA [g/cm³]	2,74	
% frazione passante al crivello da 10 mm		20,00	metodo picnometro
% frazione trattenuta al crivello da 10 mm		80,00	metodo bilancia idrostatica
Massa volumica apparente dei granuli con picnometro (passante al crivello da 10 mm)			
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA_p [g/cm³]	2,77	
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	500,0	
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	p ₁ [g]	1887,9	
<i>massa acqua nel picnometro</i>	p ₂ [g]	1565,0	
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981	
Massa volumica apparente dei granuli con bilancia idrostatica (trattenuto al crivello da 10 mm)			
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA_{bi} [g/cm³]	2,73	
<i>massa materiale essiccato nel cestello</i>	p [g]	2000	
<i>massa del materiale e del cestello in acqua</i>	p ₁ [g]	1738,4	
<i>massa del cestello in acqua</i>	p ₂ [g]	457,6	
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981	

SCORIE 8/12			
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA [g/cm³]	3,90	
% frazione passante al crivello da 10 mm		20,00	metodo picnometro
% frazione trattenuta al crivello da 10 mm		80,00	metodo bilancia idrostatica
Massa volumica apparente dei granuli con picnometro (passante al crivello da 10 mm)			
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA_p [g/cm³]	3,89	
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	500,0	
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	p ₁ [g]	1939,0	
<i>massa acqua nel picnometro</i>	p ₂ [g]	1565,0	
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981	
Massa volumica apparente dei granuli con bilancia idrostatica (trattenuto al crivello da 10 mm)			
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA_{bi} [g/cm³]	3,90	
<i>massa materiale essiccato nel cestello</i>	p [g]	2000	
<i>massa del materiale e del cestello in acqua</i>	p ₁ [g]	1954	
<i>massa del cestello in acqua</i>	p ₂ [g]	457,6	
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981	

Tabella 6.23. Massa volumica apparente

Commenti:

La prova è stata eseguita per le varie pezzature e per entrambi i tipi di aggregati. Viene confermato quanto dedotto dalla prova precedente ovvero che a parità di volume le scorie sono più pesanti del calcare. Infatti mediamente si ottiene la seguente massa volumica apparente:

- Per il calcare è $2,74 \text{ g/cm}^3$;
- Per le scorie è $3,87 \text{ g/cm}^3$.

6.2.4. RISULTATI DELLA MASSA VOLUMICA REALE DEI GRANULI DI UN AGGREGATO

La norma di riferimento è la CNR 64. Per vedere la metologia d'esecuzione e norma fare riferimento al paragrafo 3.7.5 .

CALCARE		
<i>massa volumica reale dei granuli</i>	MVR [g/cm³]	2,80
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	ρ [g]	40
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	ρ_1 [g]	1591
<i>massa acqua nel picnometro</i>	ρ_2 [g]	1565
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ_w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

Tabella 6.24. Massa volumica reale calcare

SCORIE		
<i>massa volumica reale dei granuli</i>	MVR [g/cm³]	4,78
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	ρ [g]	39
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	ρ_1 [g]	1596
<i>massa acqua nel picnometro</i>	ρ_2 [g]	1565
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ_w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

Tabella 6.25. Massa volumica reale scorie

Commenti:

Determinate le masse volumiche reali pari a $2,80 \text{ g/cm}^3$ per il calcare e $4,78 \text{ g/cm}^3$ per le scorie, nuovamente si conferma quanto commentato sopra.

Inoltre confrontando le tre prove si desume che la massa volumica reale è la più elevata fra le tre, mentre la più bassa è la massa volumica apparente non addensata. Tale risultato è spiegabile considerando che la massa volumica apparente non addensata è stata calcolata con l'aria interstiziale nell'aggregato conglobata, mentre differente è il procedimento seguito per la massa volumica apparente e quella reale poiché si è cercato di evacuare l'aria presente.

6.2.5. RISULTATI FORMA E APPIATTIMENTO DI AGGREGATI LAPIDEI

La norma di riferimento è la CNR 95. Per vedere la metologia d'esecuzione e norma fare riferimento al paragrafo 3.7.6 .

Indice di forma:

CALCARE 4/8	I_f [%]	12,8
Massa totale dei 100 o più elementi sottoposti a misura	M ₀ [g]	39,0
Massa elementi passanti al calibro secondario	M ₁ [g]	5,0
CALCARE 8/12	I_f [%]	7,5
Massa totale dei 100 o più elementi sottoposti a misura	M ₀ [g]	147,0
Massa elementi passanti al calibro secondario	M ₁ [g]	11,0
CALCARE 12/20	I_f [%]	10,5
Massa totale dei 100 o più elementi sottoposti a misura	M ₀ [g]	446,0
Massa elementi passanti al calibro secondario	M ₁ [g]	47,0
SCORIE 4/8	I_f [%]	7,8
Massa totale dei 100 o più elementi sottoposti a misura	M ₀ [g]	64,0
Massa elementi passanti al calibro secondario	M ₁ [g]	5,0
SCORIE 8/12	I_f [%]	4,18
Massa totale dei 100 o più elementi sottoposti a misura	M ₀ [g]	239,0
Massa elementi passanti al calibro secondario	M ₁ [g]	10,0

Tabella 6.26.Indici di forma

Commenti:

Per un'adeguata resistenza meccanica del conglomerato è necessario scegliere aggregati che siano meno piatti possibile ovvero che una dimensione non prevalga sull'altra. Il calcare analizzato presenta un indice di forma abbastanza basso, quindi il pietrisco risulta di forma poliedrica e quindi idoneo all'impiego. Tuttavia si nota come fra le tre pezzature prese in esame , il calcare 8/12 abbia una forma più consona all'utilizzo rispetto alle altre due pezzature.

Confrontando le geometrie del calcare con le scorie, queste ultime risultano migliori, con valori dell'indice di forma nettamente inferiori.

Indice di appiattimento:

CALCARE 4/8				
Massa del provino	M ₀ [g]	1542		
Indice di appiattimento globale del provino	I _a [-]	10,5		
d/D [mm]	M _f [g]	Ag [mm]	M _g [g]	I _{afg} [-]
50 - 63	0	31,7	0	-
40 - 50	0	25,3	0	-
31,5 - 40	0	20	0	-
25 - 31,5	0	16	0	-
20 - 25	0	12,5	0	-
16 - 20	0	10	0	-
12,5 - 16	0	8	0	-
10 - 12,5	4	6,3	0	0,00
8 - 10	107	5	7	6,54
6,3 - 8	665	4	83	12,48
5 - 6,3	492	3,15	51	10,37
4 - 5	274	2,5	21	7,66
Totale M _f [g]	1542		162	
Verifica: $\sum M_f - M_0 < 2\%$	0,00	30,84		

CALCARE 8/12				
Massa del provino	M ₀ [g]	2430		
Indice di appiattimento globale del provino	I _a [-]	11,8		
d/D [mm]	M _f [g]	Ag [mm]	M _g [g]	I _{afg} [-]
50 - 63	0	31,7	0	-
40 - 50	0	25,3	0	-
31,5 - 40	0	20	0	-
25 - 31,5	0	16	0	-
20 - 25	0	12,5	0	-
16 - 20	0	10	0	-
12,5 - 16	42	8	18	42,86
10 - 12,5	832	6,3	125	15,02
8 - 10	1034	5	113	10,93
6,3 - 8	420	4	25	5,95
5 - 6,3	77	3,15	4	5,19
4 - 5	13	2,5	0	0,00
Totale M _f [g]	2418		285	
Verifica: $\sum M_f - M_0 < 2\%$	12,00	48,6		

CALCARE 12/20				
Massa del provino	M_0 [g]	4014,48		
Indice di appiattimento globale del provino	I_a [-]	13,8		
d/D [mm]	M_f [g]	Ag [mm]	M_g [g]	I_{afg} [-]
50 - 63	0	31,7	0	-
40 - 50	0	25,3	0	-
31,5 - 40	0	20	0	-
25 - 31,5	0	16	0	-
20 - 25	123	12,5	39	-
16 - 20	867	10	166	19,15
12,5 - 16	2218	8	281	12,67
10 - 12,5	701	6,3	60	8,56
8 - 10	84	5	5	5,95
6,3 - 8	11	4	1,314	11,95
5 - 6,3	5	3,15	0	0,00
4 - 5	0	2,5	0	-
Totale M_f [g]	4009		552,314	
Verifica: $\sum M_f - M_0 < 2\%$	5,48	80,2896		

Tabella 6.27.Indici appiattimento calcare

SCORIA 4/8				
Massa del provino	M_0 [g]	1430		
Indice di appiattimento globale del provino	I_a [-]	8,3		
d/D [mm]	M_f [g]	Ag [mm]	M_g [g]	I_{afg} [-]
50 - 63	0	31,7	0	-
40 - 50	0	25,3	0	-
31,5 - 40	0	20	0	-
25 - 31,5	0	16	0	-
20 - 25	0	12,5	0	-
16 - 20	0	10	0	-
12,5 - 16	0	8	0	-
10 - 12,5	0	6,3	0	-
8 - 10	43	5	6	13,95
6,3 - 8	523	4	42	8,03
5 - 6,3	544	3,15	41	7,54
4 - 5	317	2,5	29	9,15
Totale M_f [g]	1427		118	
Verifica: $\sum M_f - M_0 < 2\%$	3,00	28,6		

SCORIA 8/12				
Massa del provino	M_0 [g]	2410		
Indice di appiattimento globale del provino	I_a [-]	4,53		
d/D [mm]	M_f [g]	Ag [mm]	M_g [g]	I_{afg} [-]
50 - 63	0	31,7	0	-
40 - 50	0	25,3	0	-
31,5 - 40	0	20	0	-
25 - 31,5	0	16	0	-
20 - 25	0	12,5	0	-
16 - 20	0	10	0	-
12,5 - 16	96	8	4	4,17
10 - 12,5	1210	6,3	47	3,88
8 - 10	933	5	49	5,25
6,3 - 8	150	4	9	6,00
5 - 6,3	11	3,15	0	0,00
4 - 5	5	2,5	0	0,00
Totale M_f [g]	2405		109	
Verifica: $\sum M_f - M_0 < 2\%$	5,00	48,2		

Tabella 6.28.Indici appiattimento scorie

Commenti:

Si può notare che l'indice di appiattimento si mantiene abbastanza basso, il che significa che gli aggregati scelti hanno una pezzatura idonea.

Tuttavia nuovamente si osserva come granulometricamente le scorie diano risultati più soddisfacenti.

6.2.6. RISULTATI DELLA DELLA RESISTENZA ALLA FRAMMENTAZIONE

La norma di riferimento è UNI EN 1097-2. Per vedere la metologia d'esecuzione e norma fare riferimento al paragrafo 3.7.7 .

CALCARE		
Numero giri	n_g [-]	500
Numero sfere	n_{sf} [-]	11
Peso passante al setaccio da 14 mm e trattenuto al setaccio da 12,5 mm	$p_{14-12,5}$ [g]	2000
Peso passante al setaccio da 12,5 mm e trattenuto al setaccio da 10 mm	$p_{12,5-10}$ [g]	3000
Peso totale iniziale	p_1 [g]	5000
Peso trattenuto al setaccio da 1,6 mm	p_2 [g]	4211
Coefficiente Los Angeles	LA	16

SCORIE		
Numero giri	n_g [-]	500
Numero sfere	n_{sf} [-]	11
Peso passante al setaccio da 11,2 mm e trattenuto al setaccio da 10 mm	$p_{10-11,2}$ [g]	2000
Peso passante al setaccio da 10 mm e trattenuto al setaccio da 8 mm	p_{8-10} [g]	3000
Peso totale iniziale	p_1 [g]	5000
Peso trattenuto al setaccio da 1,6 mm	p_2 [g]	4380
Coefficiente Los Angeles	LA	12,40

Tabella 6.29.Coefficienti di Los Angeles

Commenti:

dal momento che si sta progettando uno strato di usura, è fondamentale che il coefficiente di Los Angeles sia inferiore al 20% della massa totale. Dalle prove effettuate si deduce che il calcare rientri perfettamente nel range di valori possibili. Ancora una volta le scorie grazie alla loro resistenza meccanica tendono a frantumarsi meno rispetto al calcare.

6.2.7. RISULTATI DEI LIMITI DI CONSISTENZA (O DI ATTERBERG) DI UNA TERRA

La norma di riferimento è la NORMA CNR-UNI 10014. Per vedere la metodologia d'esecuzione e norma fare riferimento al paragrafo 3.7.8 .

Commenti:

in laboratorio si è cercato di determinare il limite liquido e plastico degli aggregati presi in considerazione. Tuttavia non si è riusciti a determinarli poiché si è riscontrata una bassissima coesione tra i granuli testati una volta imbevuti d'acqua.

8.MIX DESIGN

7.1. CAPITOLATO AUTOSTRADE DI RIFERIMENTO

La curva granulometrica di progetto della miscela dei provini utilizzati in laboratorio è stata studiata in modo tale da rientrare all'interno del fuso di riferimento del Capitolato della Società "Autostrade". Tale fuso granulometrico è costituito da due curve granulometriche ideali che fissano il limite superiore e quello inferiore. La curva granulometrica di progetto risulterà quindi idonea se ricade all'interno del fuso di riferimento.

Si è deciso a priori di produrre provini per un possibile impiego per uno strato d'usura, quindi, riferendosi al Capitolato, i setacci e le relative percentuali di passante di riferimento sono stati i seguenti:

Setacci UNI EN 933-1	MIN [%]	MAX [%]
31,5	100	100
20	100	100
14	94	100
10	77	94
6,3	57	76
2	25	38
0,5	12	22
0,25	9	17
0,063	6	10

Tabella 8.1. Setacci Capitolato delle Autostrade

Lo stesso capitolato mette in evidenza le percentuali minime e massime di bitume sul peso degli aggregati da aggiungere alla miscela:

- MIN = 5%
- MAX = 6,5%.

È stato deciso di considerare una percentuale del bitume del 5,5%.

Oltre alle percentuali di bitume il capitolato impone anche un percentuale minima e massima di vuoti del conglomerato finale:

- MIN = 3%
- MAX = 5%

Di seguito vengono messe in evidenza le percentuali degli aggregati di diversa pezzatura per l'esecuzione del mix design affinché quest'ultimo non stia all'interno del fuso di riferimento.

7.2. MIX DESIGN WMA CON CALCARE

Aggregato	%	31,5	20	14	10	6,3	2	0,5	0,25	0,063	
Sabbia 10/4	38	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	62,7%	33,5%	25,5%	14,8%	Passante
		38	38	38	38	38	23,826	12,73	9,69	5,624	Frazione
Pietrisco 4/8	37	100,0%	100,0%	100,0%	97,4%	50,8%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	Passante
		37	37	37	36,038	18,796	0,074	0	0	0	Frazione
Pietrisco 8/12	15	100,0%	100,0%	100,0%	53,4%	3,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	Passante
		15	15	15	8,01	0,57	0	0	0	0	Frazione
Pietrisco 12/20	5	100,0%	99,5%	29,8%	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	Passante
		5	4,975	1,49	0,06	0	0	0	0	0	Frazione
Filler	5	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	96,0%	67,1%	Passante
		5	5	5	5	5	5	5	4,8	3,355	Frazione

Tabella 8.2. Mix design conglomerato con calcare

Le percentuali soddisfano il fuso del Capitolato dell'Autostrade, come di seguito riportato:

MIN %	%	MAX%
100	100,0	100
100	100,0	100
94	96,5	100
77	87,1	94
57	62,4	76
25	28,9	38
12	17,7	22
9	14,5	17
6	9,0	10

Tabella 8.3. Percentuali passanti mix design con calcare

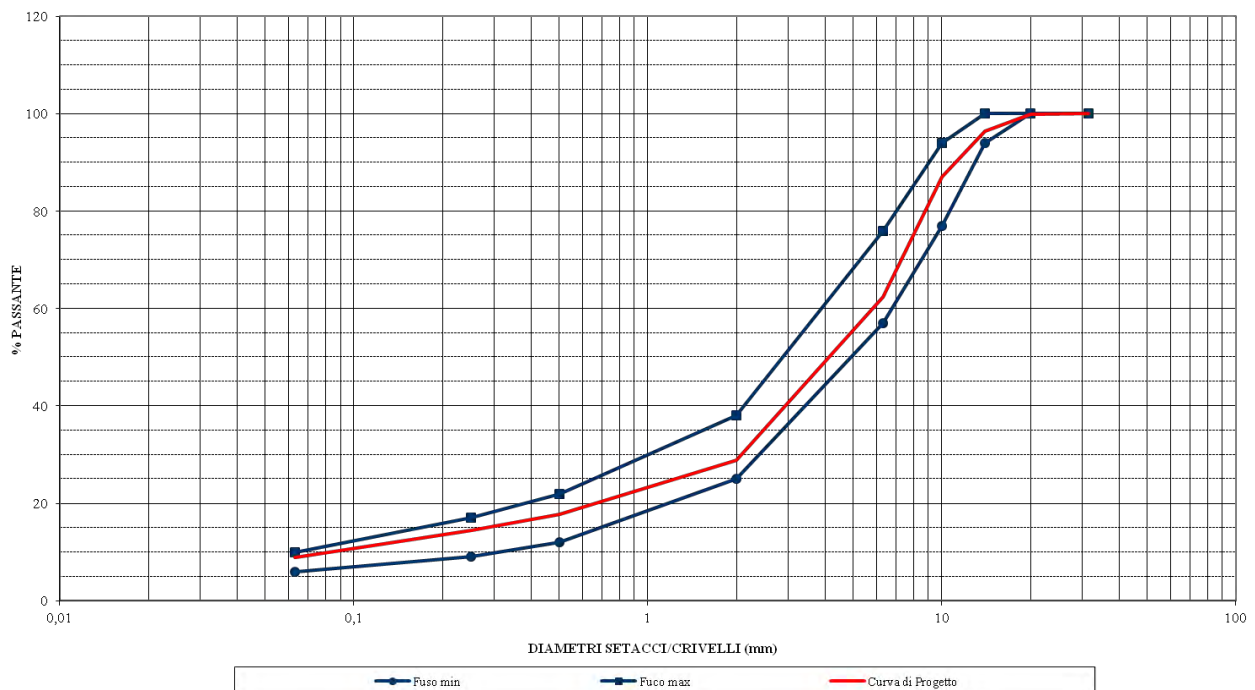


Figura 8.1 Curva granulometrica calcare all'interno del fuso Capitolato delle Autostrade

7.3. MIX DESIGN WMA CON SCORIE

Mentre nella miscela col calcare come aggregato l'utilizzo dello stesso era del 100%, in questo caso non può essere lo stesso. Per i provini WMA preparati con le scorie si è deciso in fase progettuale di utilizzare una percentuale pari al 40% di scorie sul totale e di conseguenza il 60% di calcare. Questa scelta è attribuibile al fatto di un miglior adattamento della curva granulometrica complessiva all'interno del fuso del Capitolato delle Autostrade. Oltre a questa motivazione, tale scelta è stata presa con un occhio a riguardo del trasporto: trasportare un conglomerato costituito dal 100% di scoria significherebbe una miscela molto pesante e quindi influirebbe in modo deciso sui costi di trasporto su gomma.

Aggregato	%	31,5	20	14	10	6,3	2	0,5	0,25	0,063	
Scorie 0/4	15	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	69,4%	28,4%	18,8%	9,8%	Passante
		10,6273	10,6273	10,6273	10,6273	10,6273	7,37538	3,01817	1,99794	1,04148	Frazione
Scorie 4/8	15	100,0%	100,0%	100,0%	99,8%	68,7%	0,6%	0,2%	0,2%	0,0%	Passante
		10,6273	10,6273	10,6273	10,6061	7,30099	0,06376	0,02125	0,02125	0	Frazione
Scorie 8/12	10	100,0%	100,0%	98,3%	24,0%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,0%	Passante
		7,0849	7,0849	6,96445	1,70038	0,02125	0,02125	0,02125	0,02125	0	Frazione
Pietrisco 12/20	5	100,0%	99,5%	29,8%	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	Passante
		5	4,975	1,49	0,06	0	0	0	0	0	Frazione
Filler	5	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	96,0%	67,1%	Passante
		5	5	5	5	5	5	5	4,8	3,355	Frazione
Sabbia 10/4	23	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	62,7%	33,5%	25,5%	14,8%	Passante
		23	23	23	23	23	14,421	7,705	5,865	3,404	Frazione
Pietrisco 4/8	20	100,0%	100,0%	100,0%	97,4%	50,8%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	Passante
		20	20	20	19,48	10,16	0,04	0	0	0	Frazione
Pietrisco 8/12	7	100,0%	100,0%	100,0%	53,4%	3,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	Passante
		7	7	7	3,738	0,266	0	0	0	0	Frazione

Tabella 8.4.Mix design conglomerato con scorie

Nella Tabella 8.4 è da notare come la mancanza della scoria 12/20 sia stata sostituita col pietrisco 12/20 per la motivazione citata all'inizio del capitolo. Anche in questo caso le percentuali soddisfano il fuso del Capitolato della Società "Autostrade", come di seguito riportato:

MIN %	%	MAX%
100	100,0	100
100	100,0	100
94	95,9	100
77	84,0	94
57	63,8	76
25	30,5	38
12	17,8	22
9	14,4	17
6	8,8	10

Tabella 8.5.Percentuali passanti mix design con scorie

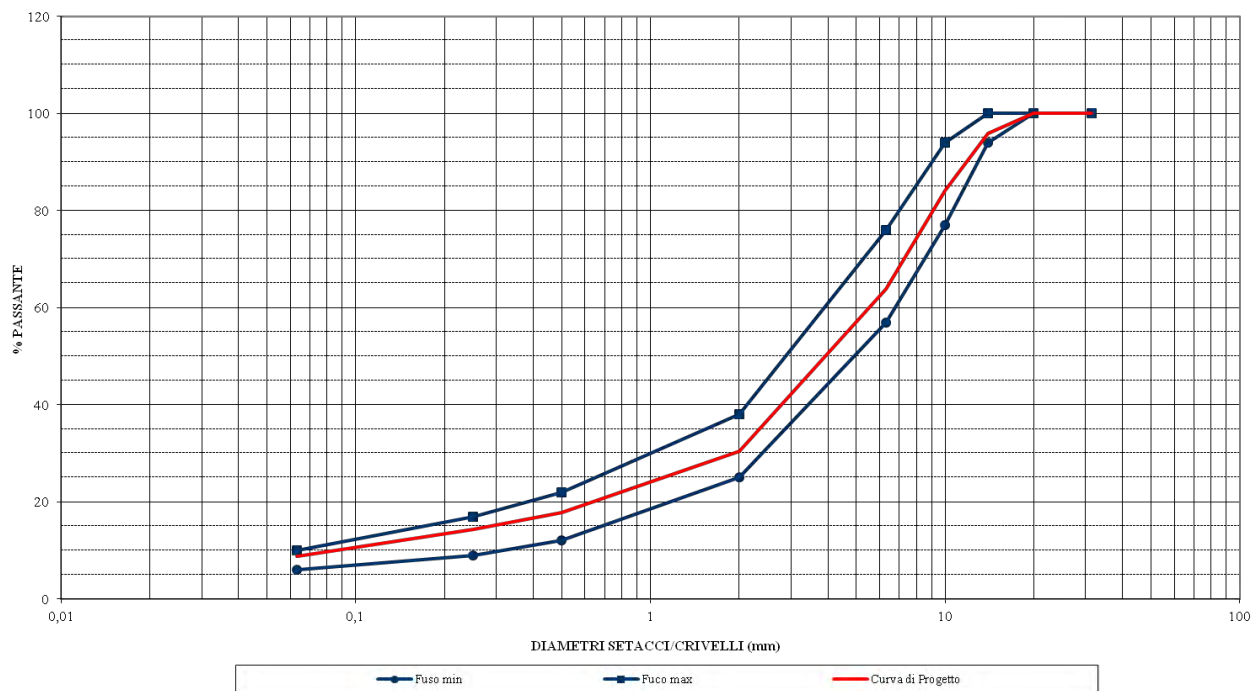


Figura 8.2 Curva granulometrica scorie all'interno del fuso Capitolato delle Autostrade

7.4. PRODUZIONE DEI PROVINI

Successivamente alla curva granulometrica, si è progettato quale sia il quantitativo ideale di aggregato in modo tale da ottenere provini cilindrici tramite fustelle (per la pressa giratoria), con la percentuale dello 5,5% di bitume, di dimensioni di 150mm di diametro e 130mm di altezza.

7.4.1. QUANTITATIVO MATERIALE PER PROVINI CONTENENTI CALCARE

Nel caso del calcare, facendo riferimento alle percentuali ottenute tramite il fuso granulometrico di riferimento, è stato considerato un quantitativo di bitume pari allo 5,5% sul peso degli aggregati e una massa volumica apparente da provini Marshall prodotti con lo stesso composto pari a:

$$MVA = \frac{PESO}{VOLUME} = 2600 \text{ kg/m}^3 \quad (7.1)$$

Tramite il calcolo del volume della fustella e quindi rovesciando la formula precedente, si è in grado di definire i pesi delle varie pezzature richieste:

Filler	5%	0,292 kg
Calcare 0/4	38%	2,216 kg
Calcare 4/8	37%	2,158 kg
Calcare 8/12	15%	0,875 kg
Calcare 12/20	5%	0,292 kg
Bitume	5,5%	0,321 kg
Totale	=	6,152 kg

Tabella 8.6. Mix design bitume e calcare

Con questi pesi è stato calcolato il quantitativo di materiale da introdurre in una fustella per la produzione di un provino di 130mm d'altezza e 150mm di larghezza.

Nota: qualsiasi quantitativo di aggregato e bitume per la produzione di un provino per fustella è stato incrementato del 3% perché è possibile durante la fase di miscelazione nel mixer che dell'aggregato o bitume rimanga bloccato o incollato sulle spatole della stessa macchina. Questo se dovesse accadere indurrebbe a produrre una miscela non coerente con quella progettata a priori.

7.4.2. QUANTITATIVO MATERIALE PER PROVINI CONTENENTI SCORIE

Nel caso delle miscele contenenti scorie è stato deciso di assumere il 60% del peso totale da destinare al calcare, mentre il 40% restante alle scorie. Così è stato deciso per una migliore configurazione della curva granulometrica all'interno dei 2 fusi del Capitolato della Società "Autostrade" come spiegato al paragrafo 7.3. Considerando le due differenti masse volumiche reali tra scorie e calcare (media tra le pezzature):

- calcare: $2,737\text{g/cm}^3$
- scoria: $3,863\text{ g/ cm}^3$

sono stati calcolati i pesi delle varie pezzature richieste facendo riferimento alle varie percentuali sul peso totale:

Filler	5%	0,360 kg
Scorie 0/4	15%	1,080 kg
Scorie 4/8	15%	1,080 kg
Scorie 8/12	10%	0,720 kg
Pietrisco 12/20	5%	0,360 kg
Sabbia I 0/4	23%	1,655 kg
Pietrisco 4/8	20%	1,440 kg
Pietrisco 8/12	7%	0,504 kg
Bitume	4,86%	0,350 kg
Totale	=	7,547 kg

Tabella 8.7. Mix design bitume, 40%scorie, 60%calcare

Con questi pesi è stato calcolato il quantitativo di materiale da introdurre in una fustella per la produzione di un provino di 130mm d'altezza e 150mm di diametro.

7.4.3. PROCEDURA PRODUZIONE PROVINI

-Per prima cosa mettere a essiccare in forno l'aggregato a 110°C per un'ora in modo tale d'asciugare l'acqua interstiziale.

-Nel frattempo accendere il miscelatore e attendere che la temperatura salga fino a quella pre impostata per il mixaggio. Siccome si devono produrre provini in conglomerato bituminoso tiepido quindi con l'aggiunta di un additivo chimico si è deciso di impostare la temperatura di miscelazione pari a 130°C . Il miscelatore infatti è dotato di riscaldatori che consentono di portare gli aggregati alla temperatura di miscelazione, consentendo quindi di mescolare gli inerti e il legante bituminoso in modo automatico tramite pale;

-Una volta asciutti, inserire gli aggregati caldi nel miscelatore e lasciarli riposare per mezzora alla temperatura di 130°C ;

- Nel frattempo portare un altro forno a 130°C e inserire all'interno il bitume 50/70 in modo tale da portarlo a una consistenza di lavorazione. Il bitume in precedenza dovrebbe essere già stato portato a 160°C in modo tale da poterlo additivare una volta liquido con lo 0,5% di additivo. Una miscelazione energica per 5-10minuti permette di eliminare ogni possibile bolla d'aria e quindi permette una buona presa col legante nativo;
- Una volta raggiunta una buona viscosità di lavorazione, versare il bitume nel miscelatore e avviare di seguito la procedura di mixaggio. Il quantitativo di bitume deve essere eseguito in funzione delle percentuali precedentemente calcolate nei paragrafi precedenti;



Figura 8.3. Miscelatore dopo aver mescolato il conglomerato

- Miscelare il conglomerato per mezzora e assicurarsi di stoppare la macchina ogni 10 minuti per togliere eventuali residui di filler dalle spatole perché l'aggregato fine tende a incollarsi e quindi non permettere una corretta miscelazione dell'impasto.
- Stoppato il mixer, si apre e si preleva il conglomerato bollente alla temperatura di 130°C (quella del mixer) e lo si deposita in opportune teglie d'acciaio precedentemente riscaldate a 130°C per venti minuti.
- Dopo di che si portano le teglie in forno e si lascia riposare il conglomerato a una temperatura di 110°C per 2 ore. Quest'ultima procedura simula lo stoccaggio del bitume nei vari macchinari prima che esso venga disteso nel manto stradale.
- Preparare le fustelle con gli adeguati spessori e vasellina e portarle in forno per 20-25 minuti alla stessa temperatura di miscelazione del conglomerato. Questo fa sì che, una volta estratto il materiale dalla miscelatrice, il bitume non subisce eventuali shock termici una volta versato all'interno della fustella.

- Passate le 2 ore, si preleva il conglomerato dalle teglie e lo si immette nelle fustelle calde . Una volta riempita la fustella è quindi possibile portarla sotto la pressa giratoria.
- Acceso quindi il pc e la relativa pressa, attraverso il software si imposta il numero dei cicli pari a 100 e il peso del bitume che precedentemente è stato pesato all'interno della fustella nella fase di riempimento (assicurarsi di togliere il peso della fustella).
- Si avvia la macchina e si attende l'arresto della stessa. Così si ottiene un provino compattato come se dovesse essere immesso in strada a un numero di cicli pari a 100. La macchina fornisce la densità del provino compattato.



Figura 8.4. Fustella, spessori, filtri e provino

Questo metodo si propone di raggiungere in laboratorio caratteristiche del materiali commisurate alla reali condizioni di impiego ed alla risposta della pavimentazione in relazione al traffico e al clima.

8.COMPATTABILITÀ

8.1. PRESSA GIRATORIA

Il compattatore giratorio (conforme alle normative EN 12697-31, AASHTO TP-4, ASTM D 6307, SHRP M-002) è dedicato alla compattazione delle miscele bituminose e di quelle granulari non legate. La pressa giratoria comprime in continuo il provino pertanto lo scheletro litico formato dall'aggregato si addensa sempre di più all'aumentare del numero di giri di compattazione. La strumentazione permette di variare l'energia di costipamento in relazione al tipo di clima ed al livello di traffico. Il modello in dotazione al laboratorio sperimentale stradale consente altresì di monitorare in continuo la resistenza a taglio sviluppata durante la compattazione.

Il compattatore in definitiva permette sia una pressione verticale sia un moto rotatorio, in modo simultaneo ai provini di conglomerato bituminoso. Questo moto, grazie all'inclinazione, mescola il conglomerato durante la fase di rotazione aumentando così la possibilità di incastro tra gli aggregati e fornendo una costipazione più simile a quella che si riscontra in sito mediante un rullo.



Figura 8.1.Pressa giratoria

Questa tecnica prevede di ottenere campioni con gradi di addensamento molto simili a quelli riscontrabili in sito. È quindi possibile raggiungere vari livelli di addensamento che rappresentano le varie fasi di vita di un conglomerato bituminoso in opera e di valutare l'attitudine alla compattazione della miscela. Nella progettazione del mix-design per una miscela con pressa giratoria l'operazione di proporzionamento degli aggregati è assolutamente necessaria, successivamente, al variare del contenuto di bitume, si addensano i provini con la pressa giratoria e si valutano i risultati come la variazione dei vuoti nella miscela.

8.2. SUDDIVISIONE PROVINI

I provini che verranno sottoposti ai successivi test, ovvero ITSM, creep dinamico e ITFT, sono stati realizzati in seguito alla procedura mediante pressa giratoria. In seguito a una maturazione, generalmente una nottata di riposo, i provini cilindrici di altezza di circa 130mm, sono stati sottoposti a taglio mediante mola circolare a lama diamantata. Questo ha permesso di ottenere dallo stesso provino 2 nuovi campioni che rispettassero le dimensioni imposte dalle normative.



Figura 8.2. Provini tagliati

8.3. PROCEDURA TRATTAZIONE RISULTATI PRESSA GIRATORIA

Dal punto di vista dei risultati si è fatto riferimento al software che gestisce la pressa giratoria. Tramite pc, è possibile inserire diversi parametri prima dell'avviamento della prova di cui il peso del provino e il numero dei cicli per la compattazione come in Figura 8.3.

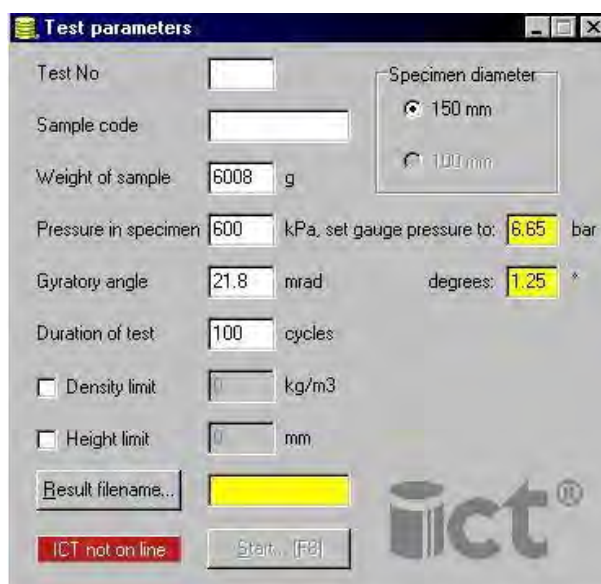


Figura 8.3 Schermata introduzione dati pressa giratoria

Una volta inserita la fustella sotto la pressa, si fa partire la macchina e attendere la fine della prova fino al compimento del centesimo ciclo. Una volta terminato si può estrarre il provino dalla fustella ancora calda essendo il conglomerato poco prima uscito dal forno.

Dal punto di vista dei risultati, il software fornisce vari dati come raffigurati nella successiva videata:

The screenshot shows a window titled "Numerical test results [WL110_1.txt]" with a toolbar and a status bar indicating "Block 1 / 1". The main content area displays test parameters and a table of results.

Test Parameters:

- 18.09.2014
- 15:35
- TEST-ID: 1
- SAMPLE CODE: WL110_1
- SAMPLE WEIGHT: 6000 g
- PRESSURE IN SAMPLE: 600 kPa
- GYRATORY ANGLE: 21.80 mrad
- GYRATORY SPEED: 28.5 rpm

Table of Results:

CYCL	HEIGHT mm	DENSITY kg/m ³	SHEAR kN/m ²	CYCL	HEIGHT mm	DENSITY kg/m ³	SHEAR kN/m ²
4	150.4	2258	258	100	126.5	2684	325
5	148.6	2286	269				
6	147.0	2310	276				
8	144.6	2349	287				
10	142.7	2380	296				
12	141.1	2406	305				
16	138.7	2448	314				
20	137.0	2479	319				
25	135.2	2511	324				
32	133.4	2546	327				
40	131.8	2576	330				
50	130.4	2605	331				
64	128.9	2635	331				
80	127.6	2661	328				

Figura 8.4. Schermata al termine della compattazione

Dalla schermata è possibile osservare come il programma calcoli a ogni determinato numero di cicli di carico la densità relativa del provino. Quest'ultima la si può definire come una densità geometrica essendo riferita alla dimensioni della fustella già precaricate dal software. Tale densità però è stata ritenuta non reale ai fini dei calcoli perché è stato riscontrato durante le varie compattazioni di entrambe le miscele un'elevata compattezza del provino una volta estratto dalla fustella. Quindi si è ricalcolata la densità di ogni campione per via idrostatica ovvero si è tenuto conto della "bulk density" relativa alla normativa UNIEN 12697-6 (vedere paragrafo 9.2) Quel che si è fatto è stato convertire la densità geometrica nella corretta densità per via idrostatica.

Per far ciò si è preso in considerazione la densità geometrica fornita dalla pressa e la si è tabulata assieme ai relativi cicli. In questo esempio viene riportato il provino WL110_1:

Densità	Cicli
2258	4
2286	5
2310	6
2349	8
2380	10
2406	12
2448	16
2479	20
2511	25
2546	32
2576	40
2605	50
2635	64
2661	80
2684	100

Tabella 8.1. Densità geometrica e relativi cicli del provino WL110-1

Tramite la norma UNIEN 12697-6, è stata calcolata la nuova densità per via idrostatica di ogni singolo provino una volta tagliato. A questo punto si è fatta la media per ogni tipo di miscela. Si è ottenuto per esempio una bulk density del conglomerato con calcare WL110 inferiore a quella geometrica.

Dopo di che è stata rapportata la bulk density media con la massima densità geometrica relativa al centesimo giro della pressa. È stato quindi rapportato l'effetto della densità reale via idrostatica per ogni ciclo.

Bulk density media	bulk density/densità max pressa		densità massima	% sulla densità massima
2454,476423	0,914484509	2064,906	2520	81,9
		2090,512		83,0
		2112,459		83,8
		2148,124		85,2
		2176,473		86,4
		2200,25		87,3
		2238,658		88,8
		2267,007		90,0
		2296,271		91,1
		2328,278		92,4
		2355,712		93,5
		2382,232		94,5
		2409,667		95,6
		2433,443		96,6
		2454,476		97,4

Tabella 8.2. Rapporto densità geometrica e bulk density

Il tutto è stato fatto in modo tale da ottenere il reale grado di compattazione ovvero la percentuale raggiunta dalla bulk density in funzione della massima densità raggiungibile dal provino.

Quest'ultima è stata calcolata tramite la normativa UNIEN 12697-5. Il relativo grafico, in questo caso per il WL110_1, sarà il seguente:

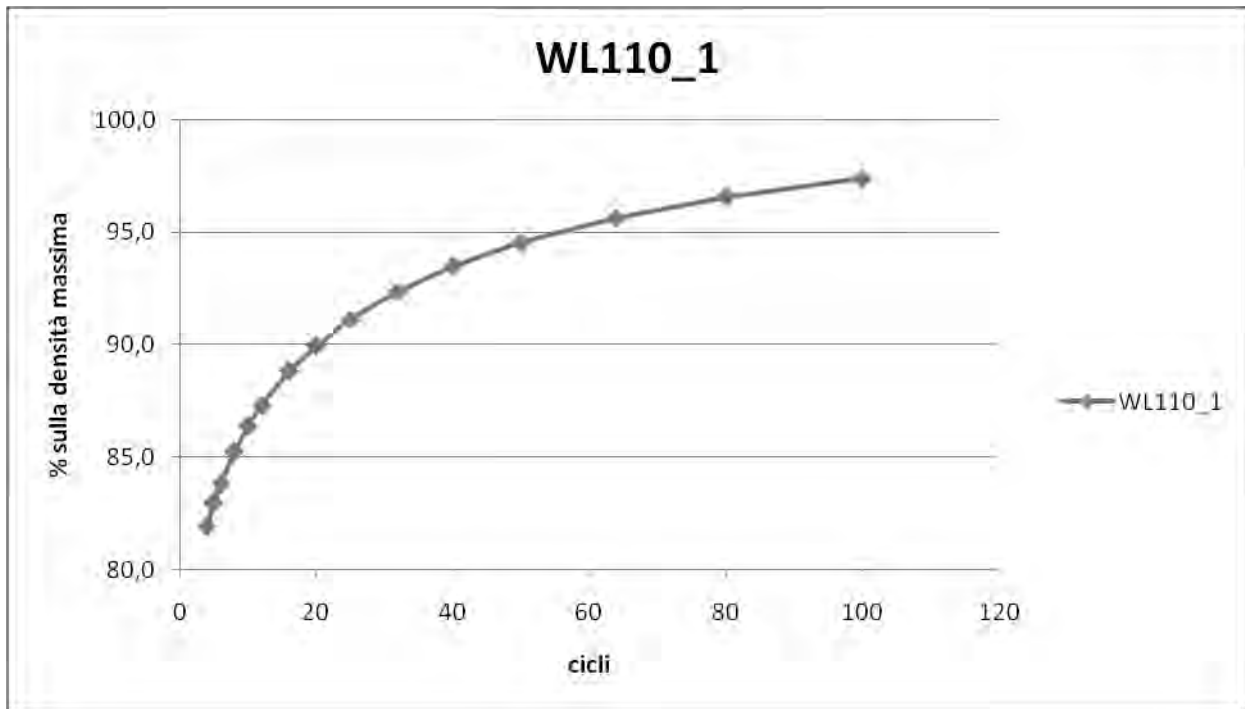


Figura 8.5 Grafico grado di compattazione sulla massima densità del provino

9.INDICE DEI VUOTI

Per il calcolo delle caratteristiche volumetriche dei provini bituminosi compattati si fa uso dell'indice dei vuoti. Tali permettono di comprendere quanto la miscela sia lavorabile o meglio, quanto il bitume sia riuscito a coprire l'aggregato e occupare gli spazi interstiziali dell'intero conglomerato. Quindi conoscere l'indice dei vuoti permette di valutare le caratteristiche della miscela dopo la stesa e compattazione. Le normative sul quale si è fatto riferimento sono: UNIEN 12697-5; UNIEN 12697-6, UNIEN 12697-8.

9.1. NORMATIVA UNIEN 12697-5

DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA DENSITÀ

3- *Termini e definizioni*

3.1- Densità massima: massa per unità di volume senza vuoti d'aria del materiale bituminoso alla temperatura di prova.

3.2- Bulk density: massa per unità di volume (contenente i vuoti d'aria) di un provino alla temperatura di prova.

4- *Principio*

La densità massima, assieme alla bulk density, è usata per calcolare il contenuto di vuoti d'aria di un provino compattato e altre proprietà connesse alla volumetria di una miscela bituminosa compattata.

Nella procedura matematica, la massima densità di una miscela bituminosa si calcola dalla sua composizione (contenuto di legante e di aggregato) e dalla densità dei materiali di cui si compone.

10- *Calcoli*

10.4.- Procedura C: Procedura matematica

10.4.1 Si calcoli la densità massima ρ_{mc} della miscela bituminosa seguendo la procedura matematica:

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\left(\frac{p_a}{\rho_a}\right) + \left(\frac{p_b}{\rho_b}\right)} \quad (9.1)$$

Dove:

ρ_{mc} è la massima densità del materiale ottenuta dal calcolo, la cui unità di misura è Mg/m^3

p_a è la quantità di aggregato presente nella miscela (in percentuale)

ρ_a è la densità apparente dell'aggregato in Mg/m^3

p_b è la quantità di legante presente in percentuale

ρ_b è la quantità di legante a 25°C in Mg/m^3

$p_a + p_b = 100\%$ in massa.

Quando si utilizzano aggregati con densità diverse, la densità massima si calcola nel seguente modo:

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\left(\frac{p_{a1}}{\rho_{a1}}\right) + \left(\frac{p_{a2}}{\rho_{a2}}\right) + \dots + \left(\frac{p_b}{\rho_b}\right)} \quad (9.2)$$

Dove:

ρ_{mc} è la massima densità del materiale ottenuta dal calcolo, la cui unità di misura è Mg/m^3

p_{a1} è la quantità dell'aggregato 1 presente nella miscela in massa (in percentuale)

ρ_{a1} è la densità apparente dell'aggregato 1 in Mg/m^3

p_{a2} è la quantità dell'aggregato 2 presente nella miscela in massa (in percentuale)

ρ_{a2} è la densità apparente dell'aggregato 2 in Mg/m^3

p_b è la quantità di legante presente in percentuale

ρ_b è la quantità di legante a 25°C in Mg/m^3

$p_{a1} + p_{a2} + \dots + p_b = 100\%$ in massa.

9.2. NORMATIVA UNIEN 12697-6

DETERMINAZIONE DELLA MASSA VOLUMICA IN MUCCHIO DI PROVINI BITUMINOSI

1- Scopo

Le Normative Europee descrivono i metodi per la determinazione della bulk density di un provino di conglomerato bituminoso compattato. (..).

Queste Normative Europee descrivono le seguenti quattro procedure e la scelta fra di esse dipende dalla quantità stimata di vuoti presente:

- a) Bulk density- dry (per i provini con una superficie molto chiusa);
- b) bulk density- saturated surface dry (SSD) (per provini con una superficie chiusa);
- c) bulk density- sealed specimen (per provini con una superficie o aperta o ruvida)
- d) bulk density by dimensions (per provini con una superficie regolare e con forme geometriche..).

4- Principio

La bulk density di un provino di conglomerato bituminoso compattato e intatto si determina dalla massa del provino e dal suo volume. La massa del provino si ottiene pesando il provino essiccato. (..)

6- Apparecchiatura

6.1.- Generali

6.1.1 Bilancia con una capacità sufficiente da pesare il provino in aria e in acqua con una precisione di 0,1 g.

6.2.- Apparecchiatura aggiuntiva

6.2.1 Bacinella d'acqua mantenuta a una temperatura uniforme. Utilizzare un filo di ferro con cui legare il provino.

6.2.2 Termometro.

6.4.- Apparecchiatura supplementare per la procedura di dimensioni

6.4.1.- Un calibro o qualsiasi altro strumento per la misura delle varie dimensioni del provino.

9- Procedure

9.3.- Procedura B: Bulk density- Saturated surface dry (SSD)

Fare come segue:

- a) Determinare il peso del provino asciutto (m_1). Quando si testano provini umidi, lo step a) deve essere eseguito dopo gli step dal b) al d).
- b) Determinare la densità dell'acqua.

c) Immergere il provino nella bacinella alla temperatura nota. Fare in modo che l'acqua saturi il provino sufficientemente a lungo fino a che il peso del provino rimane costante.

N.B.: in genere il periodo di saturazione richiesto è di 30 minuti; in ogni caso non deve superare le 3 ore.

d) Determinare il peso del provino saturato quando è immerso (m_2) stando attenti che non vi siano bolle d'aria sulla superficie del provino quando si pesa il provino.

e) Rimuovere il provino dall'acqua, asciugarne la superficie con pelle di camoscio.

f) Se l'acqua continua a sgocciolare dal provino, interrompere la procedura B e iniziare la procedura C.

g) Determinare la massa del provino dopo aver asciugato la superficie (m_3).

10- Calcoli

10.2.- Procedura B: Bulk density-SSD

Calcolare la bulk density (SSD) del provino (ρ_{bssd}) come segue:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (9.3)$$

Dove:

ρ_{bssd} è la bulk density (SSD) in Mg/m^3

m_1 è il peso del provino asciutto in grammi (g)

m_2 è il peso del provino in acqua in grammi (g)

m_3 è il peso del provino saturo immediatamente dopo averne asciugato la superficie in Mg/m^3

ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova in Mg/m^3 .

9.3. NORMATIVA UNIEN 12697-8

DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEI VUOTI DI PROVINI BITUMINOSI

4- Determinazione del contenuto di vuoti (V_m)

4.1.- Principio

Il contenuto di vuoti di un provino di conglomerato bituminoso si calcola usando la densità massima della miscela e la bulk density del provino.

4.2.- Calcolo

Il contenuto di vuoti deve essere calcolato nel seguente modo:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \text{ \% (v/v)} \quad (9.4)$$

Dove:

V_m è il contenuto di vuoti della miscela

ρ_m è la densità massima della miscela in kg/m^3

ρ_b è la bulk density del provino in kg/m^3 .

9.4. PROCEDURA PER LA DETERMINAZIONE DEI VUOTI

Per la determinazione dell'indice dei vuoti si fa riferimento alla normativa UNIEN 12697-8 in cui, alla formulazione 9.4, si ha bisogno della bulk density e della massima densità della miscela. Mentre per quest'ultima non si hanno problemi per il calcolo essendo dati ottenuti in precedenza da inserire nella formulazione 9.1 della normativa UNIEN 12697-5, per il calcolo della bulk density bisogna rilevare diversi pesi del campione. Di seguito la procedura seguita in laboratorio:

- Facendo riferimento alla normativa UNIEN 12697-6, si pesa il provino campione sulla bilancia rilevando il peso a secco " m_1 ";
- Si procede poi con l'immergere del provino all'interno di una bacinella d'acqua. La bacinella è sorretta da 2 assi di legno con relativi montanti in modo tale che l'intera struttura non influisca sul peso rilevato dalla bilancia dato che poggiano direttamente sul tavolo e non su quest'ultima. Il provino invece, immerso in acqua, sarà sorretto da un castello di ferro poggiante sulla bilancia. Il peso del castello viene detratto dal peso totale;
- Si lascia immerso il provino per almeno mezzora in modo tale che l'acqua riesca coprire tutti i vuoti interstiziali del conglomerato. Ogni tanto si deve scuotere il provino in modo tale da eliminare eventuali bolle d'aria posizionate sui bordi e superfici del provino;
- Si rileva quindi il peso " m_2 " mentre il provino rimane immerso;
- Successivamente si estrae il campione, si smonta l'incastellatura e si asciuga il provino in modo rapido giusto per non avere gocce sulla superficie e sui bordi.
- A questo punto si ripesa il provino e si rileva il peso " m_3 ";
- Avendo tutti i dati ora si procede con il calcolo della bulk density tramite formulazione n°xxx.



Figura 9.1. Incastellatura per il calcolo dell'indice dei vuoti

10. RIGIDEZZA

In questo capitolo viene spiegata la metodologia per misurare la rigidezza delle miscele bituminose utilizzando una prova a trazione indiretta. L'apparecchiatura utilizzata è stata una pressa dinamica della Cooper Research Technology attraverso la quale si possono condurre diverse prove standardizzate. La normativa sul quale si è fatto riferimento è la BS DD 213.

10.1. NORMA BS DD 213

DETERMINAZIONE DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TRAZIONE INDIRETTA DI MISCELE BITUMINOSE

1- Scopo

La norma descrive un metodo per la misura del modulo di rigidezza elastico indiretto di miscele bituminose. Esso si può applicare a provini cilindrici aventi uno spessore compreso tra i 30 e gli 80 mm.

3- Definizioni

Per gli scopi di questa norma si applica la seguente definizione.

Modulo di rigidezza elastico indiretto (S_m) in MPa

$$S_m = \frac{L}{D \times t} \times (1 + 0,27 \nu) \quad (10.1)$$

Dove:

L è il valore di picco del carico verticale applicato (in N)

D è il picco della deformazione orizzontale diametrale conseguente al carico applicato (in mm)

t è lo spessore medio del provino (in mm)

ν è il valore del modulo di Poisson per le miscele bituminose alla temperatura di prova.

4- Apparecchiatura

4.1.-Termometro o termocoppie di un appropriato intervallo di valori, che è preciso e può essere letto a $\pm 0,5^\circ\text{C}$ per determinare la temperatura del provino o della cella e dell'ambiente di prova.

4.4.- Un calibro capace di misurare a ± 1 mm.

4.9.1.- Telaio di carico in acciaio, come mostrato in Figura 10.1.

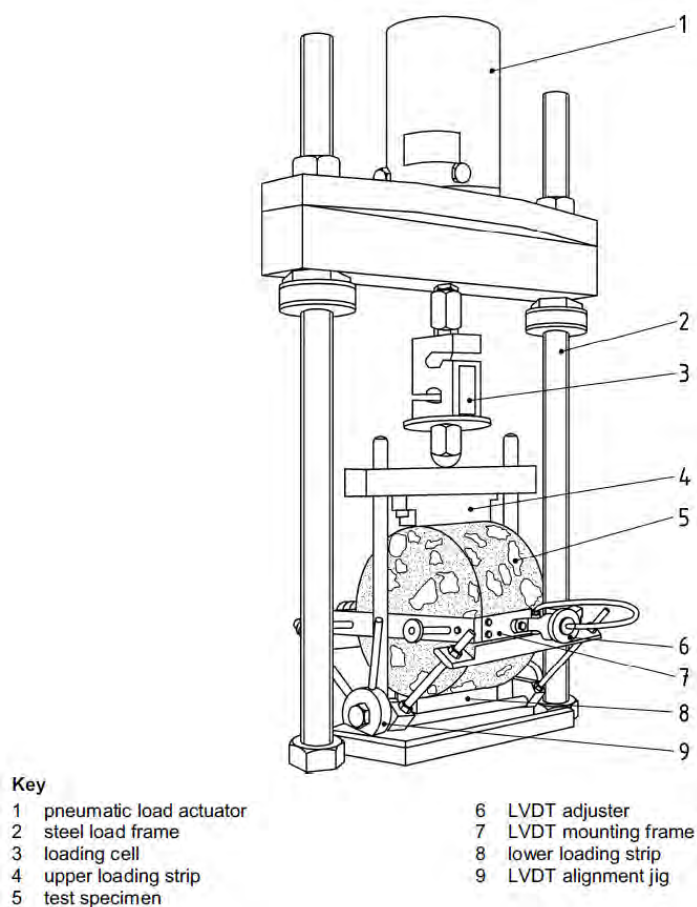


Figura 10.1 Incastellatura per l'esecuzione della prova

4.9.2 Due piastre di carico di acciaio inossidabile, aventi le facce di carico concave e con un raggio di curvatura eguale al raggio nominale del provino e di dimensioni come da tabella seguente. Il listello inferiore deve essere saldamente fissato al telaio di carico e quello superiore deve essere collegato col sistema di carico tramite una sede sferica.

<i>Diametro nominale del provino (mm)</i>	<i>Spessore del listello (mm)</i>	<i>Lunghezza del listello (mm)</i>	<i>Profondità della concavità (mm)</i>
100	12,5 ± 1	80	0,4 ± 0,05
150	19 ± 1	80	0,6 ± 0,05
200	25 ± 1	80	0,8 ± 0,05

Tabella 10.1 Concavità in funzione del diametro del provino

4.9.3.- Sistema di carico, comprendente un attuatore di carico pneumatico, per mezzo del quale un carico può essere applicato verticalmente lungo il diametro del provino da testare per mezzo dei listelli. L'attuatore deve essere in grado di applicare un impulso di carico al provino della forma della figura che segue.

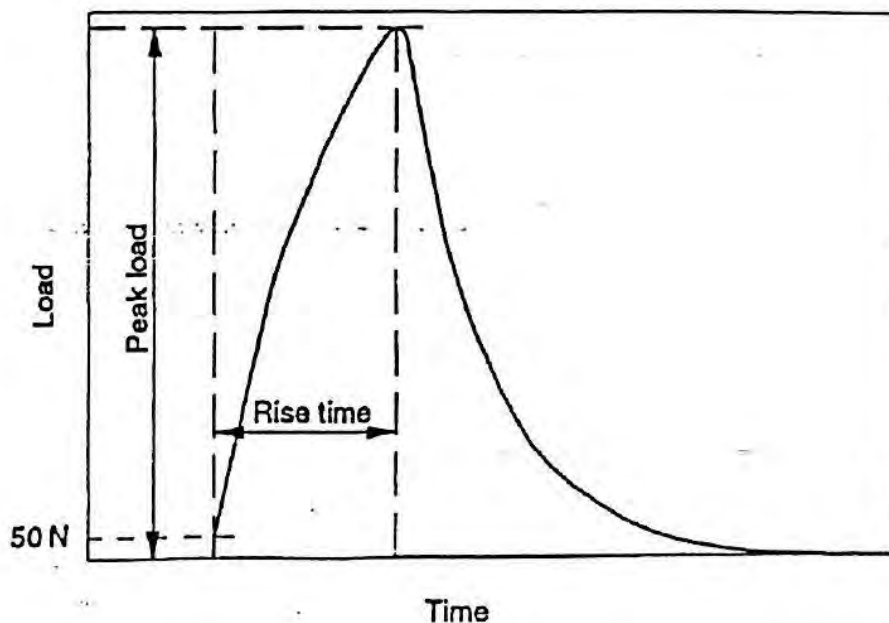


Figura 10.2 Rise-Time

Il rise-time, misurato da quando si inizia ad applicare e che è il tempo che intercorre da quando il carico applicato è nullo a quando aumenta fino al massimo valore, deve essere di 124 ± 4 ms. Il valore del picco di carico deve essere aggiustato per ottenere una deformazione orizzontale di $5 \mu m$.

Il carico applicato deve essere misurato a $\pm 2\%$ usando una cella di carico calibrata in accordo alla BS 1610: Parte 1: 1992.

NOTA 1. Il rise-time specificato è di 124 ± 4 ms; tuttavia si possono utilizzare altri valori di rise-time. L'impulso di carico applicato è scelto in modo da raggiungere un picco di deformazione orizzontale. Esperienze inglesi indicano che valori adatti di picco di deformazione orizzontale sono $7 \pm 2 \mu m$ per un provino di 150 mm di diametro e $5 \pm 2 \mu m$ per un provino di 100 mm di diametro, anche se, con certi materiali, altri valori di picco di deformazione possono essere richiesti per generare un adeguato carico e un'adeguata risposta de formativa.

4.10.- Sistema di misurazione delle deformazioni, capace di misurare il picco della deformazione orizzontale diametrale transitoria del provino, conseguente dall'applicazione dell'impulso di carico lungo il diametro del provino, perpendicolare alla direzione di applicazione del carico.

La precisione della misura deve essere migliore di $1 \mu m$ su un range di $\pm 0,1$ mm.

Il sistema per la misura della deformazione orizzontale è mostrata nella figura a seguire. Due trasduttori differenziali variabili lineari (LVDTs) sono montati diametralmente opposti l'uno all'altro in un rigido telaio serrato al provino da testare. Il castelletto non si deve muovere una volta fissato e non deve essere sostenuto durante il test.

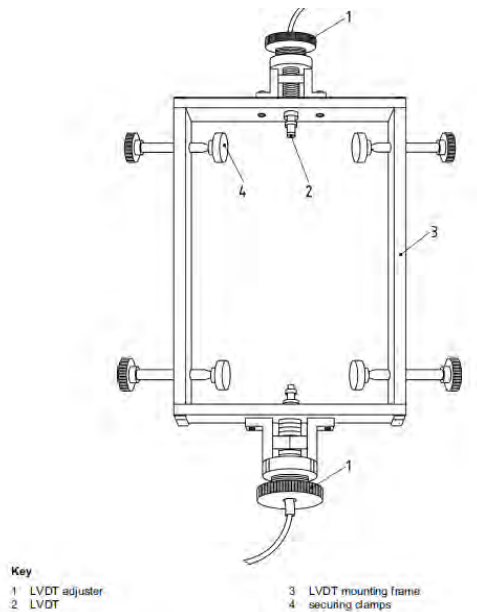


Figura 10.3 Listello per il posizionamento dei trasduttori

4.11.- Un sistema di misurazione, comprendente un'interfaccia digitale connessa ad un microcomputer, che monitora e registra i segnali elettrici dall'attuatore e dagli LVTDs. Il sistema registra l'impulso di carico e il picco di deformazione orizzontale che ne deriva per la durata di ciascun impulso ad una frequenza tale per cui il rise-time può essere determinato.

4.12 sistema per mantenere costante la temperatura, che consiste in una cella o una camera con aria forzata in circolazione, nella quale i provini da testare possono essere condizionati e in cui si può eseguire la prova.

7- *Condizionamento e temperatura di prova*

Il provino deve essere posto alla temperatura del test $\pm 1^\circ\text{C}$ finché esso ha raggiunto tale temperatura. Alternativamente, riporre i provini alla specificata temperatura di prova per tutta la notte. Il provino deve essere poi posto nella cella a temperatura costante e a $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

8- *Procedura del test*

8.1.- Montaggio del provino da testare

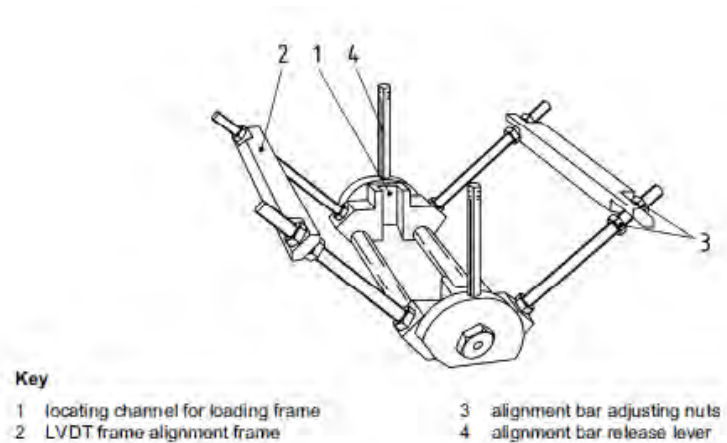


Figura 10.4: Castelletto per l'appoggio della piastra con trasduttori

Pulire i listelli e verificarli che non siano danneggiati. Dopo aver portato il provino alla specificata temperatura di prova, posizionarlo centralmente sul listello inferiore. Fissare il sistema di misura delle deformazioni al provino simmetricamente rispetto ad un asse passante per il centro del provino e perpendicolarmente alla direzione di carico e all'asse di simmetria del provino. Il sistema di misurazione può essere montato appoggiandolo dapprima al castelletto sopra riportato.

Collocare il listello superiore al centro del provino e collocare il tutto al di sotto dell'attuatore.

Portare i congegni per la misurazione delle deformazioni all'incirca a metà del loro range di funzionalità per assicurare un adeguato movimento appunto dei trasduttori in entrambe le direzioni. Prima di applicare il carico al provino, sistemare la posizione del castelletto in modo tale le barre laterali non siano in contatto né col provino, né col sistema di misura delle deformazioni orizzontali.

Applicare cinque impulsi di condizionamento per disporre il provino sul listello e per far sì che il sistema aggiusti il carico in modo da ottenere la specificata deformazione orizzontale.

8.2.- Procedura di misurazione

8.2.1 Portare i sistemi di misura delle deformazioni al loro range di funzionamento per correggere eventuali deformazioni permanenti che si siano verificate durante gli impulsi di condizionamento. Applicare ulteriori cinque impulsi al provino e, per ogni impulso applicato, misurare e registrare il picco di carico, il picco di deformazione orizzontale e il rise-time.

8.2.2 Usare la media dei cinque impulsi, si calcoli il modulo di rigidità per ogni impulso usando l'equazione prima riportata e usare il modulo di Poisson appropriato in base alla tabella che segue.

Temperatura di prova °C	Modulo di Poisson
0	0,25
10	00,25
20	0,35
30	0,45

Tabella 10.2 Modulo di Poisson in funzione della temperatura

8.2.3 Rimuovere il provino dal sistema, ruotarlo di $90 \pm 10^\circ\text{C}$ circa e riporlo seguendo la procedura descritta precedentemente. Ripetere il test e i calcoli in accordo ai punti 8.2.1 e 8.2.2. Se il valore medio del modulo di rigidezza da questo test differisce entro il 10% dalla media calcolata dal primo test, fare la media delle due prove e registrare questo come valore di modulo del provino.

Se la differenza tra i due valori è più grande del 10%, ripetere il test sullo stesso provino lungo gli stessi diametri. Se la differenza persiste, riportare la media risultante per ogni diametro individualmente.

10.2. PRESSA DINAMICA COOPER RESERCH TECHNOLOGY

Il sistema è conforme alle normative *EN 12697-25*, *EN 12697-26*, *DD ABF*, *DD 213*, *DD 226*, *BS 59 e*, *AASHTO TP-46*. L'apparecchiatura è alloggiata in una cella climatica per il controllo della temperatura e può eseguire prove su conglomerati bituminosi o su miscele granulari e a legante idraulico (per la determinazione del Modulo Resiliente e della resistenza ultima a taglio).

Il sistema consente di eseguire prove non distruttive a trazione indiretta ciclica, prove cicliche di compressione diametrale, prove di compressione statica o ciclica per la caratterizzazione meccanica e reologica dei conglomerati bituminosi (determinazione della rigidezza e della resistenza alla fatica ed alle deformazioni permanenti)



Figura 10.5. Castelletto



Figura 10.6. Cooper test

10.3. PROCEDURA IN LABORATORIO PROVA ITST

-Per l'esecuzione della prova si prepara il provino nel castelletto dove verranno posizionati i trasduttori laterali come in Figura 10.5.

-Si posiziona il provino all'interno della cella della Cooper test (Figura 10.6) affinché la semisfera superiore del castelletto sia perfettamente in asse col pistone pneumatico del macchinario.

-Si aziona il pc col software relativo alla prova ITSM e si procede subito con la prima fase relativa all'introduzione dati. In ordine: temperatura, dati geometrici, Poisson, Rise time, deformazione laterale e numero di impulsi:

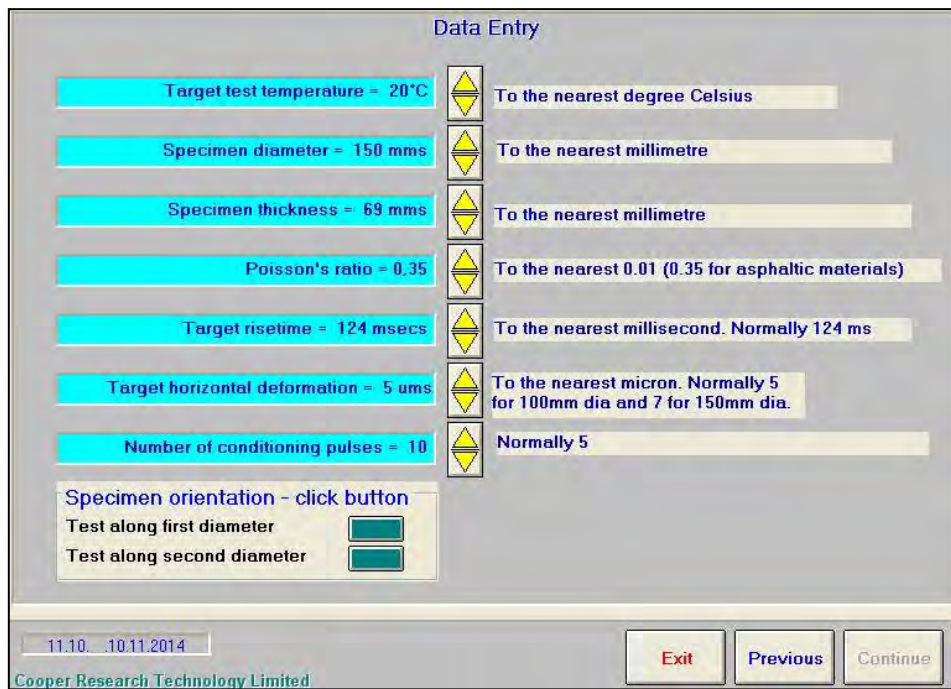


Figura 10.7. Introduzione dati ITSM

- Si procede con la fase di calibrazione del pistone del macchinario sul listello superiore del castelletto una volta posizionato sotto al carico.

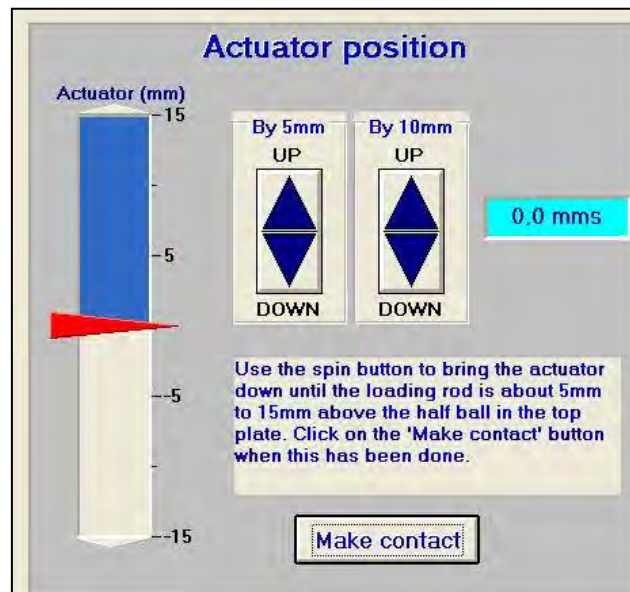


Figura 10.8. Make contact ITSM

- Si posizionano ora i trasduttori laterali in modo tale che appoggiano sul diametro orizzontale del provino. Questi permettono di rilevare la deformazione laterale del provino una volta soggetto al carico assiale centrale. Per un perfetto posizionamento il software può venir incontro a questa esigenza tramite la successiva finestra di dialogo.

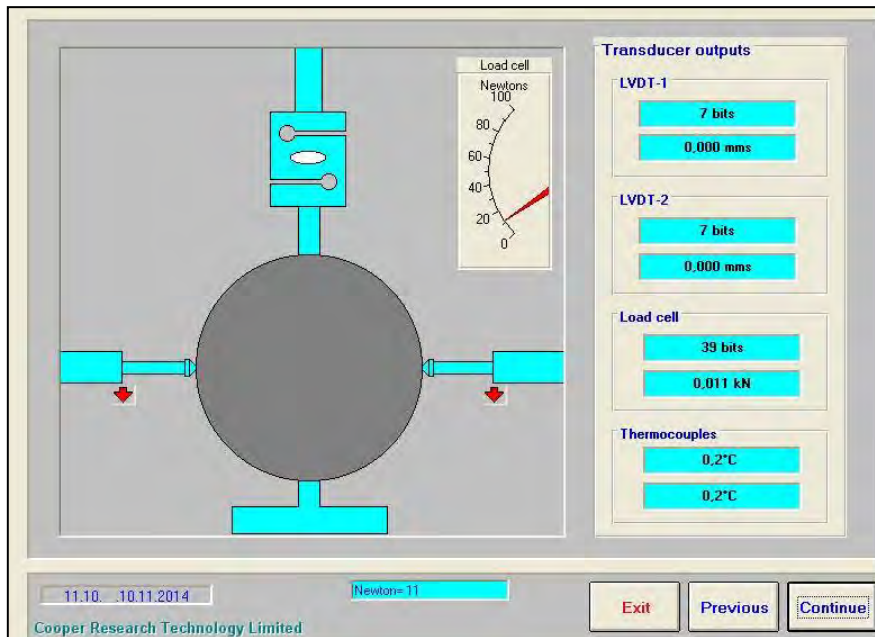


Figura 10.9. Posizionamento trasduttori laterali

- Si sussegue poi una fase di 10 impulsi in modo tale che il software riconosce e assesta il campione aggiustando quindi il livello di carico. Nel pannello di controllo viene evidenziato in bianco l'onda di deformazione mentre in rosso la curva di carico.

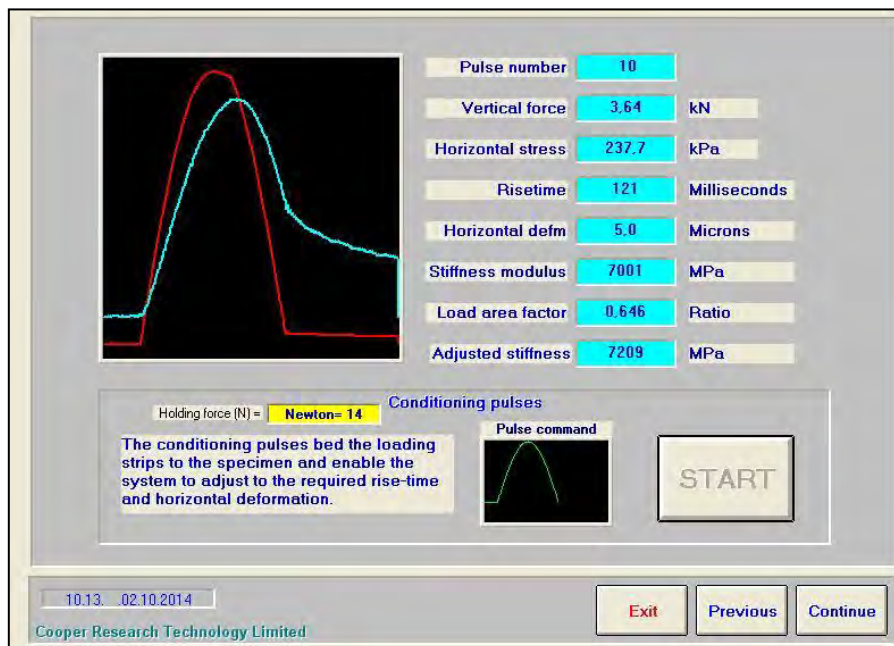


Figura 10.10. Schermata di precarico ITSM

- Ultimata la fase di preconditionamento si prosegue con la schermata successiva ovvero quella relativa al vero proprio test per il calcolo della rigidezza. Il software calcola direttamente la media della rigidezza derivante dai 5 impulsi come in Figura 10.11.

Il software fornirà 2 rigidezze per impulso: quella teoria basata su una curva realistica dell'impulso di carico e una aggiustata. Si terrà conto di quest'ultima.

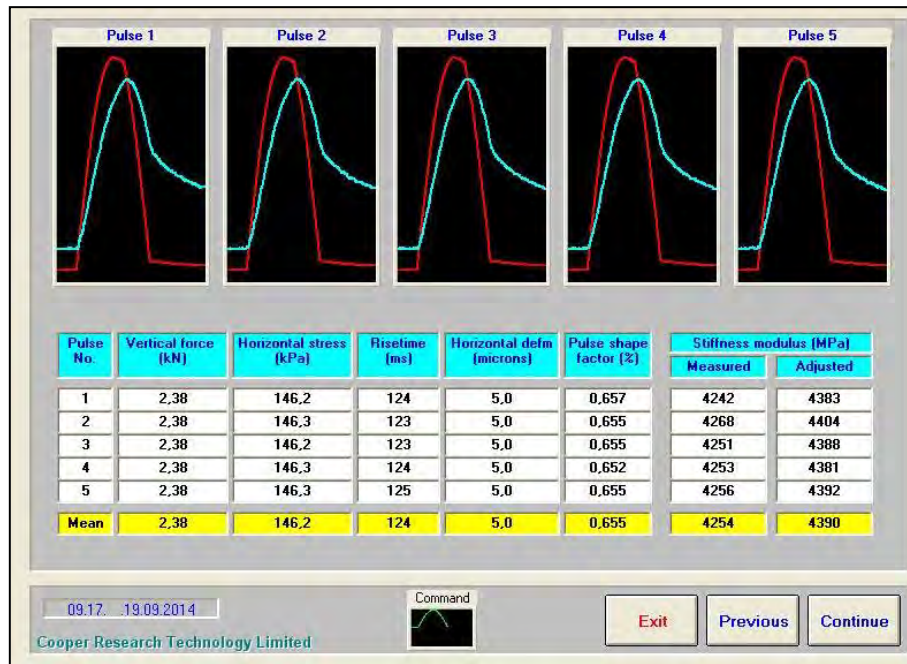


Figura 10.11. Calcolo rigidezza media tramite 5 impulsi

- Ripetere l'intera procedura dopo le 5 pulsazioni ruotando il provino nel castelletto di 90° e ricalcolare sul nuovo diametro ortogonale a quello precedente il relativo modulo medio di rigidezza.
- La rigidezza finale di ogni singolo provino sarà la media delle medie dei 5 colpi per entrambi i diametri.

11. DEFORMAZIONI PERMANENTI

Per lo studio delle deformazioni permanenti si fa riferimento a una prova in cui il provino subisce nel tempo un carico monoassiale. Tale prova ha lo scopo di mettere in risalto il comportamento reologico del materiale ed in particolare le sue caratteristiche viscoso nel subire deformazioni permanenti nel tempo

Per l'esecuzione di tale prova si fa riferimento alla norma UNIEN 12697-25, metodologia di prova di tipo A.

11.1. NORMATIVA UNIEN 12697-25

COMPRESSIONE CICLICA-METODO A

La norma descrive due metodi di prova (A e B) per determinare la resistenza di bituminoso miscela a deformazione permanente.

-Metodo di prova A consiste nel determinare le caratteristiche di scorrimento delle miscele bituminose mediante una prova di compressione ciclica uniassiale con qualche confinamento presente. In questo test un campione cilindrico è sottoposto a una sollecitazione assiale ciclica. Per raggiungere un certo confinamento, il diametro della piastra di carico è inferiore a quello del campione.

-Metodo di prova B consiste nel determinare le caratteristiche di scorrimento di miscele bituminose per mezzo di una compressione ciclica triassiale. In questo test un campione cilindrico è sottoposto a un carico assiale ciclico. Questo test è spesso utilizzato ai fini della valutazione e sviluppo di nuovi tipi di miscela.

4. *METODO A – COMPRESSIONE CICLICA UNIASSIALE CON CONFINAMENTO*

4.1- *Principio*

Questo metodo di prova determina la resistenza alla deformazione permanente di un campione cilindrico a carico ripetuto. I campioni possono essere o preparati in laboratorio o essere estratti dalla parte centrale di una pavimentazione.

Un provino cilindrico con un diametro di 150 mm, mantenuto a una temperatura elevata di condizionamento, è posto tra due piastre parallele. La piastra superiore ha un diametro di 100 mm. Il campione viene sottoposto a una pressione assiale ciclica, come rappresentata in Figura 11.1.

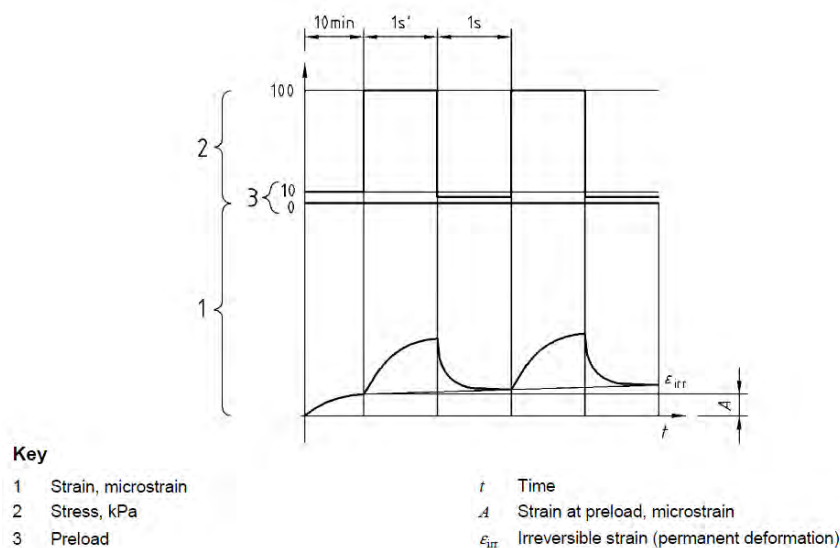


Figura 11.1. Curva di deformazione

Non vi è alcun ulteriore pressione di contenimento laterale applicata. Durante la prova la variazione dell'altezza del campione viene misurata a numeri specifici di applicazione del carico. Da questo, la deformazione assiale cumulativa (deformazione permanente) del provino è determinata come funzione del numero di applicazioni di carico. I risultati sono rappresentati in una curva di scorrimento come indicato nella Figura 11.1.

Da questo, le caratteristiche di scorrimento del campione vengono calcolate. Il test permette di classificare varie miscele o per verificare l'accettabilità di un determinato mix.

4.2- Apparecchiatura

4.2.1- Test sistema

4.2.1.1- Apparato della compressione

Un dispositivo di prova atti a generare un impulso di carico ciclico a onda quadra, con frequenza di 0,5 Hz e un carico di (100 ± 2) kPa. Il dinamometro deve avere una capacità di almeno 2000 N. Tutti componenti devono essere costruiti in acciaio resistente alla corrosione.

4.2.1.2.- Configurazione di carico

La piastra inferiore deve avere una superficie che si estende almeno 5 mm dal campione. Le dimensioni della piastra superiore è la seguente: diametro $(100 \pm 0,5)$ mm, spessore $(25 \pm 0,5)$ mm) e di massa $(1,55 \pm 0,05)$ kg.

La piastra superiore deve essere munita di semisfera autoallineante, mentre la piastra inferiore, deve essere fissa o tenuta in posizione da una sede. Sia la parte inferiore sia la piastra superiore sono realizzate in acciaio resistente alla corrosione indurito con lucido di superficie (piana e liscia).

4.2.1.2- *Sistema di controllo e misurazione*

Per il controllo, la lettura e la raccolta dei dati necessari si fa riferimento a un software. Il sistema di controllo garantisce il parametro fisico da controllare (forza) non mostra oscillazioni.

4.2.1.3- *Trasduttori di spostamento*

Il sistema di misurazione della deformazione comprende due trasduttori di spostamento per misurare e registrare la deformazione assiale cumulativa del provino, misurando la variazione di distanza fra le piastre di carico durante la prova. Il range di misura dei trasduttori deve essere almeno di 5 mm.

4.2.1.4- *Camera termostatica*

Deve mantenere il campione alla temperatura di prova specificata. La precisione del controllo della temperatura è di ± 1 °C o superiore.

4.3- *Preparazione campione*

4.3.1.- Almeno cinque campioni devono essere preparati per il test.

4.3.2.- Ogni campione di prova deve avere forma cilindrica. Il campione di prova deve essere considerato secco dopo almeno 8 ore di asciugatura e minimo 4ore di condizionamento.

4.3.3.- Dimensioni provini, misurate sul campione di prova in accordo con la norma EN 12697-6. procedura D: i campioni devono avere un'altezza di (60 ± 2) mm e un diametro di (148 ± 5) mm.

4.3.5- La densità apparente del provino deve essere misurata secondo la norma EN 12697-6.

4.4.- *Condizionamento*

4.4.1.- I campioni devono essere conservati a una temperatura compresa tra 5°C e i 25°C. I campioni non devono essere impilati uno sopra l'altro. Eventuali danni devono essere prevenuti.

4.4.2.- Le prove devono iniziare prima di 2 giorni dopo la compattazione in laboratorio.

4.4.3- I campioni devono essere puliti, se necessario mediante spazzolatura o lavaggio, come richiesto.

4.4.4.- I campioni sono asciugati a temperatura ambiente fino a massa costante.

4.4.5.- Per ridurre al minimo l'attrito tra le piastre di carico e provino, le facce d'estremità del campione deve essere liscia e piana.

4.4.6.- Stabilizzare il campione alla temperatura di prova con un'approssimazione di $\pm 1,0$ °C per almeno 4 ore e non più di 7 ore.

4.5.- *Procedura*

4.5.1.- Sono richiesti almeno 5campioni per la prova.

4.5.2.- La temperatura della prova (40°C). deve essere mantenuta per tutta la durata della prova.

4.5.3.- Il campione deve essere posizionato ben centrato con l'asse di prova tra le due piastre. Due trasduttori di spostamento sono posizionati sulla piastra di carico, uno di fronte all'altro. Poi si applica un precarico per 10 minuti (600s).

4.5.4.- La deformazione deve essere registrata dopo il precarico. Un valore tipico di precarico $(72 \pm 7) \times 10^{-3}$ kN. Corrisponde a una tensione di 10 ± 1 kPa.

4.5.5.- Subito che si è conclusa la fase di precarico, il carico ciclico è applicato con una serie di impulsi da $(1 \pm 0,05)$ s. La precisione sul periodo di carico è di $\pm 10\%$ o superiore. Il periodo di riposo tra gli impulsi è di $(1 \pm 0,05)$ s ovvero una frequenza di circa 0,5 Hz. In totale sono 3600 impulsi applicati. La prova dura 2 ore. Un valore tipico per il carico assiale I_s $(72 \pm 14) \times 10^{-3}$ kN che corrisponde a una sollecitazione di (100 ± 2) kPa per provino con diametro 96 mm).

4.5.6.- Nel corso della prova devono essere effettuate le misurazioni regolari della deformazione permanente totale. Come minimo i rilevamenti sono eseguiti dopo le seguenti applicazioni di carico: 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 300 ecc per 3600 secondi. Si raccomanda di misurare la deformazione in un momento fisso nel ciclo di carico/scarico.

4.6.- *Calcoli ed espressioni dei risultati*

4.6.2- *Creep rate e moduli del creep*

Se richiesto, si deve calcolare il creep rate, f_c , rapportando i microstrain col numero dei cicli, e il modulo del creep, E_n , in megapascal, dalle seguenti equazioni per un determinato intervallo di cicli di carico:

$$f_c = \frac{\varepsilon_{n1} - \varepsilon_{n2}}{n_1 - n_2} \quad (11.1)$$

dove:

f_c è il creep rate, in microstrain su numero di cicli;

ε_{n1n2} è la deformazione cumulativa assiale del campione dopo n_1 e n_2 applicazioni di carico in microstrain;

$n_1; n_2$ è il numero di ripetizioni del carico.

$$E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon_n} \cdot 1000 \quad (11.2)$$

dove:

E_n è il modulo del creep dopo n carichi, in megapascal (MPa);

σ è la tensione, in kilopascal (kPa);

ε_n è la deformazione cumulativa assiale dopo n applicazioni del carico (%).

11.2. PROCEDURA IN LABORATORIO PROVA CREEP DINAMICO

In questa prova sono stati utilizzati 6 provini quindi 3 campioni per i WL e 3 campioni per i WS. Le dimensioni dei provini sono in accordo col punto 4.3.3. della normativa UNI EN 12697-25 una volta che sono stati prodotti dalla pressa giratoria. Come per il modulo di rigidezza si è utilizzata la medesima macchina ovvero pressa dinamica Cooper Reserch Technology.

PPROCEDURA

- Dopo una fase di preconditionamento dei provini a una temperatura di 40°C per non meno di 4ore, il test viene eseguito alla medesima temperatura.
- Si prende una provino alla volta e lo si adagia sul listello inferiore. Sulla superficie superiore del provino si appoggia un filtro di carta e si appoggia sopra nuovamente il piatto che farà dall'alloggio alla semisfera autoregolante. Quest'ultima sarà la parte a contatto col pistone della pressa in cui trasmetterà tramite il piatto sottostante il carico ripetuto ciclico.
- Una volta posizionato il castelletto col provino sotto alla pressa a una temperatura di 40°C, si avvia il pc e il relativo programma per la prova di deformazioni permanenti.



Figura 11.2. Posizionamento provino sotto alla pressa della Copper

- Il programma chiede fin da subito le caratteristiche del provino e della prova. Si imposta una temperatura di 40°C come già accennato, le misure geometriche del provino quindi spessore e diametro, la tensione del carico di 100kPa, un numero di pulsazioni di 3600s (durata due ore complessive), una tensione di preconditionamento di 10kPa per una durata di 600s ovvero 10minuti.



Figura 11.3 Introduzione dati per la prova di deformazioni permanenti

- Si procede con la fase di calibrazione del pistone del macchinario sul listello superiore del castelletto una volta posizionato sotto al carico.

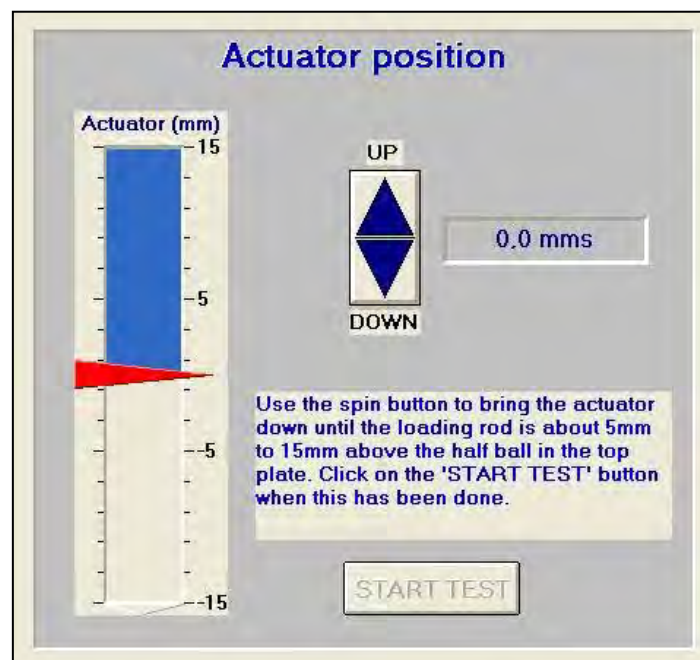


Figura 11.4. Make contact del pistone per il creep dinamico

- Si posizionano i due trasduttori verticali affianco al pistone. Queste andranno a rilevare la deformazione dovuta al continuo carico pulsante al centro del provino.

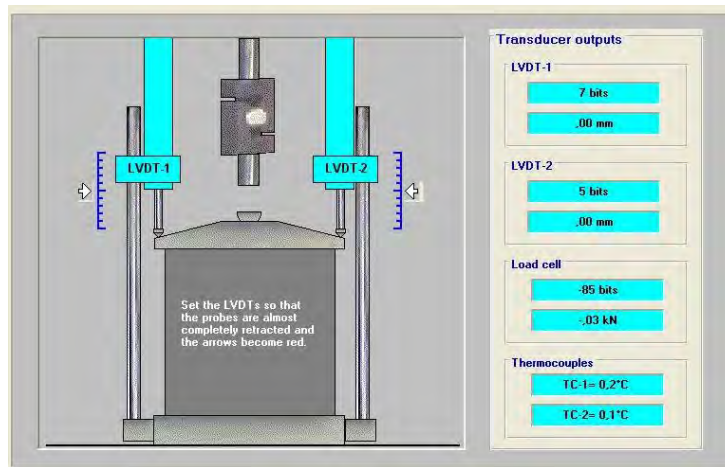


Figura 11.5. Posizionamento guidato dei trasduttori

- Si avvia la prova. Il programma avvierà da subito una prima fase di precarico di 10kPa per 10minuti. Una volta ultimata inizierà la vera prova in cui si susseguiranno impulsi di 100kPa per 2 ore (3600 impulsi). Il programma disegnerà la curva delle deformazioni permanenti e restituirà anche un file "txt" in cui a ogni pulsazione corrisponderà una determinata deformazione (vedi allegati).

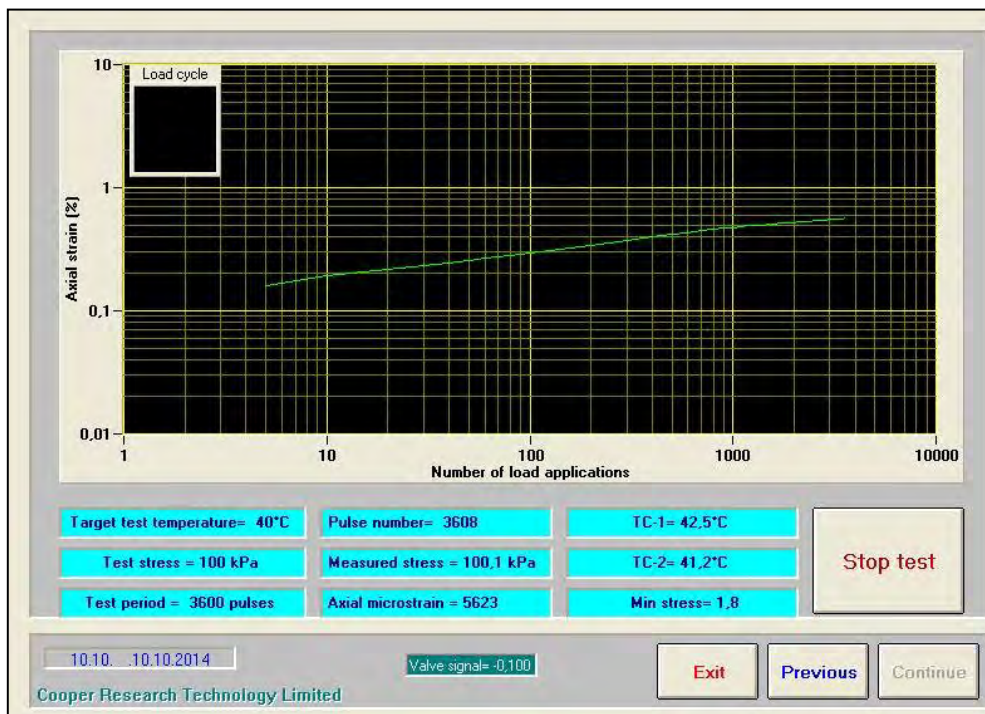


Figura 11.6. Videata di dialogo a fine prova del creep dinamico

- Quello di cui si è interessati, oltre al numero di cicli, è la deformazione “axial microstrain”. Oltre a questo compaiono altre informazioni come la temperatura della termocamera e la tensione misurata.

12. FATICA

Durante la prova tutti i provini verranno portati a rottura attraverso l'ausilio di una serie di impulsi aventi carico costante e definito preliminarmente. La norma di riferimento per il corretto svolgimento del test è la BS DD ABF sulla resistenza a fatica; la macchina è la stessa usata per la determinazione dei moduli di rigidezza.

12.1. BS DD ABF

METODO PER LA DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA A FATICA DI MISCELE BITUMINOSE USANDO IL METODO DELLA TRAZIONE INDIRETTA

5- Scopo

Questo test descrive il metodo per determinare la resistenza alla fessurazione di miscele bituminose. Il metodo è applicabile a provini di forma cilindrica aventi spessore compreso tra i 30mm e 75mm e diametro di 100mm. Il metodo dovrebbe essere sempre considerato come un'indicazione sulla formazione delle fessure nelle miscele bituminose. Si deve essere cauti quando si citano valori finiti o quando si confrontano i risultati di diversi materiali testati in condizioni diverse o testati con metodi diversi

3- Definizioni

3.2.1.- La rottura di un provino è il punto in cui vi è 9mm di deformazione verticale nella parte superiore lungo l'asse di carico.

3.2.2.- Per calcolare la massima tensione di trazione al centro del campione in kPa:

$$\sigma_{x,\max} = \frac{2 \cdot P_l}{\Pi \cdot d \cdot t} \quad (12.1)$$

dove:

P_l è il carico applicato in KN;

d è il diametro del provino (mm);

t è lo spessore del provino (mm);

3.2.2.- Per calcolare la massima deformazione al centro del campione in microstrain:

$$\varepsilon_{x,\max} = \frac{\sigma_{x,\max} \cdot (1 + 3\nu)}{S_m} \cdot 1000 \quad (12.2)$$

dove:

$\sigma_{x,max}$ è la massima tensione al centro del provino (kPa);

ν è il coefficiente di Poisson, assunto pari a 0,35;

S_m è il modulo di rigidezza a trazione indiretta (MPa).

4- *Sommario della prova*

4.1.- Le dimensioni dei campioni di prova devono essere misurati e registrati. I campioni sono quindi condizionati alla temperatura di prova prima di essere centrati nel telaietto di prova con le superfici piane del campione perpendicolari alla linea di carico. L'asse di carico viene posizionata in modo che sia localmente centrata sul provino. Il carico viene quindi applicato tramite l'apparecchiatura di prova. Ciascun campione viene testato a un diverso carico di rottura al centro del campione.

4.2.- Per ogni campione, la massima deformazione di trazione orizzontale al centro del campione viene calcolata col coefficiente Poisson, la tensione di rottura al centro del campione e il modulo di rigidità a trazione indiretta.

4.3.- Il modulo di rigidezza è una tensione correlata alla natura visco elastica del bitume.

5- *Apparecchiatura*

5.1.- Termometro che abbia l'accuratezza dello $\pm 0.2^\circ\text{C}$ per la determinazione della temperatura del campione e dell'ambiente di lavoro;

5.5.- Piastra quadrata d'acciaio quadrato di dimensioni 250mm x 250mm. La superficie superiore della piastra non deve deviare la planarità di oltre 0,05 millimetri.

5.7.- Sega, in grado di tagliare i provini e rifilarmi alle dimensioni richieste.

5.8- Attrezzatura per la prova, che comprende i seguenti strumenti:

5.8.1- Telaio di carico, come raffigurato nella successiva figura:

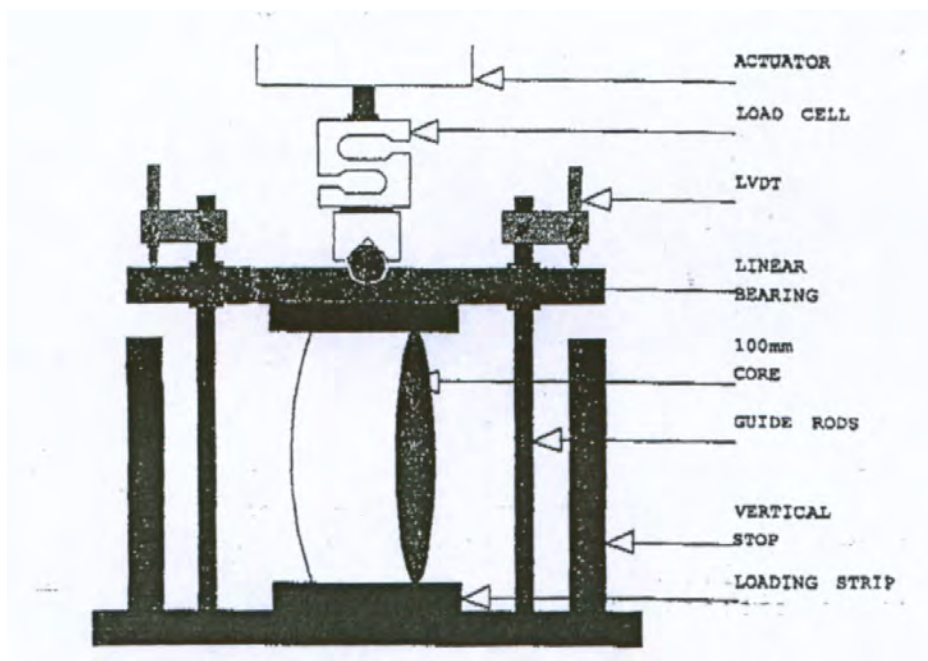


Figura 12.1. Strumentazione di prova per la resistenza a fatica

5.8.2.- Due piani di carico, conformi con la successiva tabella. Le facce in contatto col provino devono essere concave ed estese oltre la larghezza del provino. La piastra sottostante deve garantire il fissaggio del telaio sovrastante.

Diametro provino (mm)	Larghezza faccia di carico(mm)	Concavità (mm)
100	12.5±1	0.4
150	19±1	0.6
200	25±1	0.8

Tabella 12.1. Dimensioni delle piastre di carico

5.8.3.- Sistema di carico. Tale incorpora un attuatore di carico adatto, per mezzo del quale un carico può essere applicato lungo il diametro verticale del provino attraverso le piastre di carico. L'attuatore del carico deve essere in grado di applicare un impulso di carico al provino come nella figura sottostante. Il tempo di salita, misurato da quando la macchina inizia a imprimere il carico, è il tempo necessario affinché il carico parta da zero al valore massimo. Tale tempo deve essere di 124ms±4ms.

Il fattore dell'area di carico è il rapporto tra l'area ombreggiata nella figura sottostante e il prodotto tra tempo di salita e carico di punta. Il fattore d'area di carico ottimale deve essere di 0.60 e se il valore medio per tutto il test scosta di oltre 0,05 allora il campione di prova deve essere scartato. Quando il modulo di rigidità di un materiale è relativamente elevato allora la capacità del sistema di carico può essere insufficiente per generare la tensione di trazione orizzontale specifica. In questo caso può essere necessario uno spessore del provino ridotto.

5.9.- Sistema di misura della deformazione, composto da due trasformatori lineari variabili differenziali (LVDT) con un intervallo minimo di 9 mm e una precisione dello $\pm 0.1\%$. Il sistema è in grado di misurare la deformazione cumulativa e un deformazione transitoria del provino durante la prova misurando quindi la variazione della distanza tra le piastre di carico.

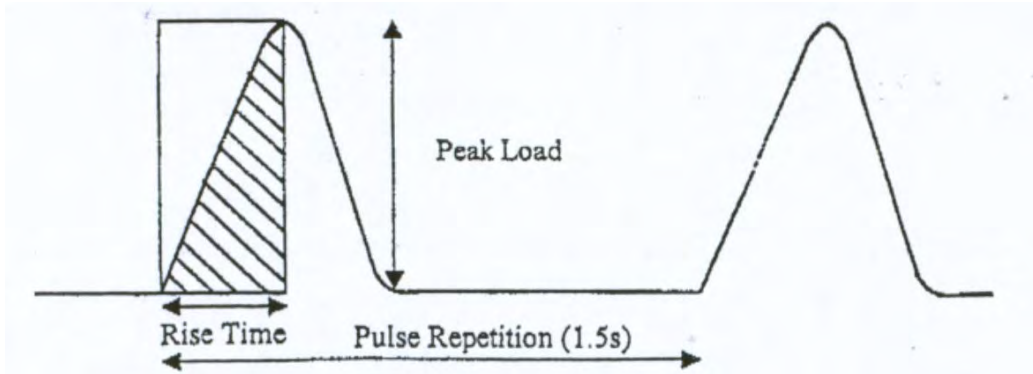


Figura 12.2. Forma della pulsazione del carico

5.10.- Sistemi di registrazione , comprendenti un'unità di interfaccia digitale collegato a un microcomputer, il quale permette di monitorare e registrare i segnali elettrici, dai trasduttori di carico e deformazione. La velocità di acquisizione dei dati deve essere tale che il segnale da ciascun trasduttore possa essere letto a una velocità di almeno 500Hz.

5.11.- Temperatura costante. La macchina deve essere comprendente di un mobile o una camera adatta alla circolazione d'aria forzata, in cui il campione di prova può essere condizionato e la prova successivamente eseguita.

6- Provini per la prova

I campioni devono essere preparati in laboratorio o estrapolati da una pavimentazione. La metodologia per la preparazione deve essere inclusa nel rapporto della prova.

6.1.- Preparazione

Utilizzando la sega, tagliare il provino per la prova di diametro nominale $100\text{mm} \pm 5\text{mm}$, per. Rimuovere eventuali trucioli che sporgono dalla superficie in seguito al taglio. Bloccare il cilindro e tagliarlo in modo tale da avere uno spessore per provino compreso tra i 30 mm e i 75 mm. Per misurare lo spessore di ciascun campione agire in questa maniera: posizionare il campione su un ripiano e tramite un righello ricavare il diametro, ambo le facce del provino.

Ripetere queste misurazioni su altre due diametri opportunamente distanziati in modo uniforme (cioè per la misura di tre diametri calcolarli ogni 60°).

Se la differenza tra il più piccolo e il più grande dei sei diametri misurati è più al 2% del diametro nominale del provino allora il provino deve essere scartato.

6.2.- *Conservazione dei provini*

Se la conservazione dei provini è meno di 4 giorni la temperatura non deve superare i 25°C. Per una conservazione oltre i 4 giorni la temperatura non deve superare i 5°C. Le temperature e il tempo devono essere registrati. I campioni devono essere conservati su una superficie piana su un superficie orizzontale e non devono essere impilati.

7- *Condizionamento*

Il campione di prova devono essere posto in un ambiente a temperatura controllata e monitorato affinché non abbia raggiunto la temperatura di prova. La temperatura del provino è determinata ponendo un campione fittizio, con termocoppie sulla superficie e al centro, adiacente al provino. La temperatura del campione fittizio viene sorvegliata affinché le misurazioni indicano che il provino abbia raggiunto la temperatura di prova e la differenza di temperatura tra la superficie e il centro non sia superiore a 0,4°C. La media di queste temperature è registrata come temperatura effettiva del campione (T). Il campione deve essere poi spostata alla temperatura del test. La temperatura di prova consigliata per i test è di 20°C. È raccomandato che la temperatura di prova non superi i 40°C. I campioni possono essere conservati e condizionati e testati all'interno dello stesso macchinario.

8- *Procedura*

8.1.- *Temperatura del test*

La temperatura di prova è di norma 20°C ± 0,5°C. La temperatura nominale non deve superare i 40°C. Gli operatori devono essere consapevoli che se le prove dovessero eseguirsi a basse temperatura, i test potrebbero progredire nel tempo.

8.3.- *Prove a fatica a trazione indiretta*

8.3.1.-Posizionare il campione sotto l'asse di carico in modo che le due facce del campione siano perpendicolari allo stesso asse. Posizionare il listello di carico sulla parte superiore del campione e controllare affinché non ci sia un movimento eccessivo.

8.3.4- Applicare un carico di 40±1 pulsazioni per minuto.

8.3.5.- Registrare il numero dei carichi applicati al provino.

9- *Procedura per l'analisi della fatica*

9.1.- *Numero di determinazioni*

9.1.1.- Per un test completo, effettuare le determinazioni in non meno di dieci campioni per miscele con una dimensione dell'aggregato massima nominale di 20 mm e inferiore, e su almeno dodici campioni per le miscele con una dimensione dell'aggregato massima nominale superiore a 20 mm.

9.1.2.- Per un test limitato, effettuare determinazioni in non meno di cinque campioni per miscele con una dimensione massima nominale di 20 mm e inferiore e non inferiore a dieci campioni per le miscele con un aggregato di dimensione massima nominale superiore a 20 mm.

10- Calcoli

10.1.- Massima tensione di trazione al centro del provino

$$\sigma_{x,\max} = \frac{2 \cdot P_l}{\pi \cdot d \cdot t} \quad (12.3)$$

dove:

P_l è il carico applicato in KN;

d è il diametro del provino (mm);

t è lo spessore del provino (mm);

10.2 .-Massima deformazione orizzontale al centro del provino

Si calcoli la massima deformazione orizzontale al centro del provino, $\varepsilon_{x,\max}$ (microstrain) dalla seguente formula:

$$\varepsilon_{x,\max} = \frac{\sigma_{x,\max} \times (+3\nu)}{S_m} \times 1000 \quad (12.4)$$

Dove:

$\sigma_{x,\max}$ è la tensione massima al centro del provino (kPa);

ν è il modulo di Poisson (assunto pari a 0,35);

S_m è il modulo di rigidezza alla tensione $\sigma_{x,\max}$ (MPa).

10.3 .-Tabulazione dei risultati

Si tabulino i risultati per ogni provino testato. Si riporta un esempio di seguito.

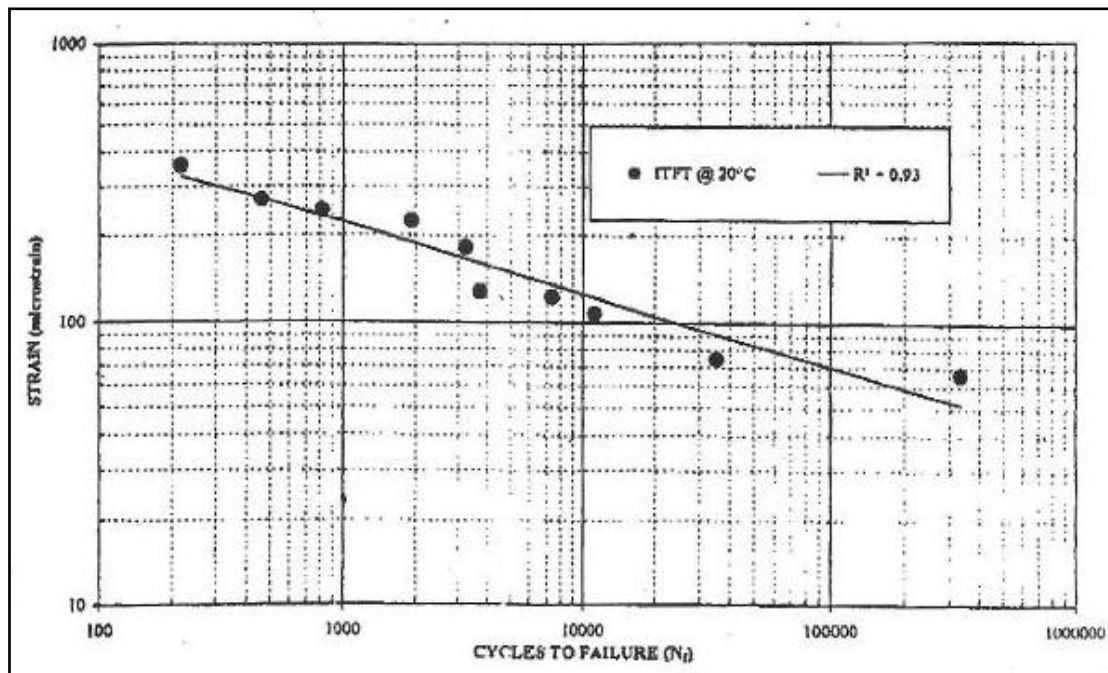
<i>Provino</i>	<i>Tensione $\sigma_{x,max}$</i> <i>(kPa)</i>	<i>Modulo di rigidezza</i> <i>(MPa)</i>	<i>Deformazione $\varepsilon_{x,max}$</i> <i>(microstrain)</i>	<i>Cicli a rottura (N_f)</i>
1	600	3425	359	217
2	200	3816	107	11176
3	100	3100	66	334589
4	300	4818	128	3730
5	400	3332	246	820
6	500	3806	269	460
7	350	3179	226	1926
8	250	4169	123	7365
9	325	3657	182	3251
10	150	4115	75	35273

10.4.- Generazione della relazione di fatica per miscele bituminose

10.4.1.- Si grafichi la massima deformazione orizzontale al centro del provino ($\varepsilon_{x,max}$) in funzione del numero di cicli a rottura (N_f) usando gli assi orizzontale e verticale logaritmici.

10.4.2.- Si applichi un'analisi di regressione lineare il metodo dei minimi quadrati ai dati accoppiati $\log_{10}(\varepsilon_{x,max})$ e $\log_{10}(N_f)$ al fine di ottenere l'equazione della retta.

Nota 1: Un esempio di questa retta a fatica lineare è riportata nella figura seguente:



Nota 2: Si deve notare che i provini dello stesso materiale devono stare sulla stessa retta.

10.5.- Significato statistico

10.5.1- Si calcoli il quadrato del coefficiente di correlazione (R^2) dell'analisi di regressione lineare.

10.5.2- Se il valore di R^2 è inferiore a 0,90, si testino ulteriori provini e si incorporino i risultati nel set di dati fino a che, ripetendo l'analisi di regressione lineare, il valore di R^2 è superiore a 0,90.

10.5.3- Se, dopo 10 provini aggiunti ai dati, il valore di R^2 è ancora inferiore a 0,90, i risultati devono essere riportati con una nota riguardante il significato statistico dei dati.

Nota. Se questi ulteriori provini non sono disponibili, i risultati devono essere riportati con una nota riguardante il significato statistico dei dati.

12.2. PROCEDURA IN LABORATORIO PROVA ITFT

I provini utilizzati per la prova ITFT sono gli ultimi 5 a disposizione per miscela, ovvero 5 campioni per i WL e 5 campioni per i WS.

La prova è stata eseguita con la stessa macchina come le altre due prove, ovvero la pressa dinamica Cooper. Si è deciso di imporre un controllo di tensione visto che non era disponibile un sistema di misura della deformazione orizzontale durante la prova. La prova è configurata comunque secondo la normativa BS DD ABF dove la rottura viene intesa come il collasso completo del provino.

PPROCEDURA

-Dopo una fase di condizionamento dei provini a una temperatura di 20°C per non meno di 4 ore, il test viene eseguito alla medesima temperatura.

-Preso un provino, viene posizionato in un telaio metallico tra i due listelli di carico e successivamente sotto l'attuatore.



Figura 12.3. Telaio per prova ITFT

-Successivamente si avvia la macchina Cooper. Quest'ultima è controllata da un software, nel quale devono essere inseriti i parametri sul carico e sulla forma dei provini, che rende la procedura automatica. A questo punto tramite video (Figura 12.1 si inseriscono i dati principali della prova quindi range di temperatura (20°C), diametro e spessore del provino, tempo di picco (124ms), deformazione massima (30mm), tensione di applicazione. Quest'ultima è pari a :300-350-400-450-500kPa.

Le tensioni sono applicate uno alla volta selezionando i 5 provini per miscela da sottoporre a una determinata tensione: a provini aventi modulo di rigidità più elevato sono applicate tensioni più elevate. Viceversa, a provini con moduli più bassi sono applicate tensioni più basse. In quest'ultimo caso la prova ha interessato più di un giorno di utilizzo.



Figura 12.4. Schermata inserimento dati ITFT

-Una volta fatto scendere il pistone (schermata “make contact” come nelle precedenti prove) è possibile iniziare la prova. Di seguito la restituzione grafica una volta portato a rottura il provino.

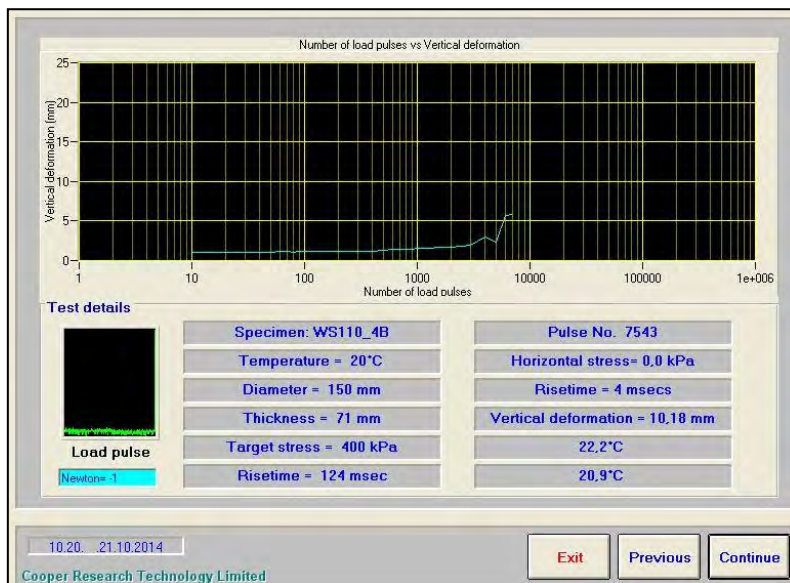


Figura 12.5. Schermata illustrativa fine prova ITFT

-Nella colonna a sinistra della videata compaiono le informazioni di partenza inserite all’inizio della prova mentre a destra compaiono altre informazioni di cui quella più importante ovvero il numero di cicli di carico che ha portato a collasso il provino per quella determinata tensione.

Parte III:

RISULTATI e

ANALISI DEI DATI

13. RISULTATI INDICE DEI VUOTI

Vengono in un primo momento sviluppati i risultati dell'indice dei vuoti perché poi serviranno per l'esecuzione delle curve di compattazione ottenuta dalla pressa giratoria.

13.1. DENSITÀ MASSIMA

Per il calcolo della densità massima si fa riferimento come già accennato alla normativa UNIEN 12697-5. Ricordando le densità apparenti degli aggregati:

Materiale	ρ (Mg/m ³)	ρ (Mg/m ³)
Calcare 0/4	2,7556	2,73725
Calcare 4/8	2,7494	
Calcare 8/12	2,7363	
Calcare 12/20	2,7077	

Tabella 13.1 Massa volumica apparente calcare

Materiale	ρ (Mg/m ³)	ρ (Mg/m ³)
Scorie 0/4	3,8023	3,8635
Scorie 4/8	3,8929	
Scorie 12/20	3,8953	

Tabella 13.2 Massa volumica apparente scorie

Si ottiene:

WL110

provino	pa [%]	pa [Mg/m ³]	pb [%]	pb [Mg/m ³]	densità massima [Mg/m ³]
WL110_1A	94,79	2,73725	5,21	1,03	2,520
WL110_1B	94,79	2,73725	5,21	1,03	2,520
WL110_2A	94,79	2,73725	5,21	1,03	2,520
WL110_2B	94,79	2,73725	5,21	1,03	2,520
WL110_3A	94,79	2,73725	5,21	1,03	2,520
WL110_3B	94,79	2,73725	5,21	1,03	2,520
WL110_4A	94,79	2,73725	5,21	1,03	2,520
WL110_4B	94,79	2,73725	5,21	1,03	2,520

Tabella 13.3 Densità massima WL110

WS110

provino	pa [%]	pa [Mg/m3]	ps [%]	ps [Mg/m3]	pb [%]	pb [Mg/m3]	densità massima [Mg/m3]
WS110_1A	57,219	2,73725	38,15	3,8635	4,63	1,03	2,8347
WS110_1B	57,219	2,73725	38,15	3,8635	4,63	1,03	2,8347
WS110_2A	57,219	2,73725	38,15	3,8635	4,63	1,03	2,8347
WS110_2B	57,219	2,73725	38,15	3,8635	4,63	1,03	2,8347
WS110_3A	57,219	2,73725	38,15	3,8635	4,63	1,03	2,8347
WS110_3B	57,219	2,73725	38,15	3,8635	4,63	1,03	2,8347
WS110_4A	57,219	2,73725	38,15	3,8635	4,63	1,03	2,8347
WS110_4B	57,219	2,73725	38,15	3,8635	4,63	1,03	2,8347

Tabella 13.4 Densità massima WS110

13.2. BULK DENSITY

Per il calcolo della bulk density si fa riferimento come già accennato alla normativa UNIEN 12697-6, procedura B ovvero metodo della "saturated surface dry SSD".

WL110

provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	ρ_w (1 Mg/m3)	bulk density [Mg/m ³]
WL110_1A	2900,6	1747,8	2904,1	0,99756	2,4524
WL110_1B	2960,1	1781	2964,1	0,99756	2,4459
WL110_2A	2922	1761,1	2925,2	0,99756	2,4540
WL110_2B	2942,1	1771,4	2944,5	0,99756	2,4519
WL110_3A	2907,1	1754,9	2910,9	0,99756	2,4587
WL110_3B	2955,8	1779,4	2960,9	0,99756	2,4456
WL110_4A	2915,7	1763,5	2918,3	0,99756	2,4687
WL110_4B	2942,9	1776,4	2946,6	0,99756	2,4587

Tabella 13.5 Bulk density WL110

WS110

provino	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]	ρ_w (1 Mg/m3)	bulk density [Mg/m ³]
WS110_1A	3308,9	2141,6	3314,6	0,99756	2,7540
WS110_1B	3496,8	2263,4	3501,8	0,99756	2,7568
WS110_2A	3381	2191,1	3385,7	0,99756	2,7633
WS110_2B	3424,9	2209,9	3429,8	0,99756	2,7407
WS110_3A	3369,1	2183,5	3372,5	0,99756	2,7666
WS110_3B	3439	2224,9	3444,3	0,99756	2,7534
WS110_4A	3318,8	2154,1	3321,7	0,99756	2,7755
WS110_4B	3491,6	2264,4	3494,5	0,99756	2,7715

Tabella 13.6. Bulk density WS110

La media delle bulk density per miscela è pari a:

WL110 MEDIA	2,4545 Mg/m3
WS110 MEDIA	2,7602 Mg/m3

Tabella 13.7 Media finale bulk density per miscela

13.3. INDICE DEI VUOTI

Avendo ora a disposizione sia la densità massima sia la bulk density per entrambe le miscele, è ora possibile calcolare l'indice dei vuoti facendo quindi riferimento alla normativa UNIEN 12697-8.

WL110

provino	vuoti [%]	media [%]
WL110_1A	2,67	2,59
WL110_1B	2,93	
WL110_2A	2,61	
WL110_2B	2,69	
WL110_3A	2,42	
WL110_3B	2,94	
WL110_4A	2,02	
WL110_4B	2,42	

Tabella 13.8 Indice vuoti miscela WL110

WS110

provino	vuoti [%]	media [%]
WS110_1A	2,85	2,63
WS110_1B	2,75	
WS110_2A	2,52	
WS110_2B	3,32	
WS110_3A	2,40	
WS110_3B	2,87	
WS110_4A	2,09	
WS110_4B	2,23	

Tabella 13.9 Indice vuoti miscela WS110

COMMENTI: non si presentano sostanziali dissomiglianze tra le miscele, anzi, gli indici dei vuoti ottenuti sono sostanzialmente uguali. Quindi in un primo momento non sembra esserci differenza nell'uso di calcare o scorie nella miscela. È chiaro come l'indice dei vuoti per entrambe le miscele sia molto basso infatti i provini sono molto chiusi. Il capitolato autostrade imponeva un minimo del 3% e un massimo del 5% (paragrafo 1). Tale obiettivo non è stato raggiunto dai provini preparati in laboratorio per entrambe le miscele perché non è stato fatto un mix design ottimizzato avendo quindi scelto a priori un dosaggio del bitume pari al 5,5%. Per ragioni di tempistiche non si è accurato il mix design anche perché tale tesi è rivolta a uno studio comparativo tra miscele e non prestazionale dei singoli composti.

14. RISULTATI PRESSA GIRATORIA

Di seguito vengono riportati i risultati della pressa giratoria e relativi grafici. Ogni ciclo tiene conto dell'effetto della bulk density ritenuta la densità più idonea rispetto a quella geometrica fornita in primo momento dalla pressa. I grafici invece tengono conto del grado di compattazione ovvero la percentuale della bulk density in funzione della massima densità raggiungibile dal provino.

14.1. GRADO COMPATTAZIONE WL110

WL110_1

Cicli	bulk density [Mg/m ³]	% sulla densità massima
4	2064,91	81,94
5	2090,51	82,96
6	2112,46	83,83
8	2148,12	85,24
10	2176,47	86,37
12	2200,25	87,31
16	2238,66	88,84
20	2267,01	89,96
25	2296,27	91,12
32	2328,28	92,39
40	2355,71	93,48
50	2382,23	94,53
64	2409,67	95,62
80	2433,44	96,57
100	2454,48	97,40

Tabella 14.1 Grado compattazione WL110_1

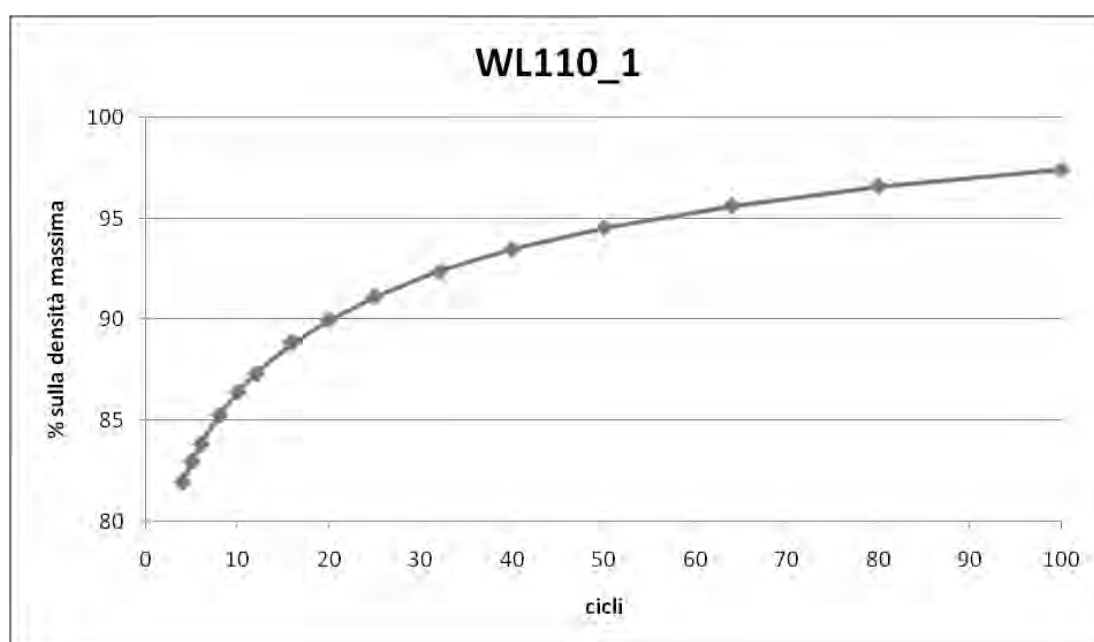


Figura 14.1 grado compattazione WL110_1

WL110_2

Cicli	bulk density [Mg/m ³]	% sulla densità massima
4	2076,38	82,40
5	2101,76	83,40
6	2122,62	84,23
8	2157,07	85,60
10	2186,09	86,75
12	2208,76	87,65
16	2245,93	89,12
20	2274,04	90,24
25	2303,06	91,39
32	2333,88	92,61
40	2361,99	93,73
50	2387,38	94,74
64	2414,58	95,82
80	2436,34	96,68
100	2454,48	97,40

Tabella 14.2. Grado compattazione WL110_2

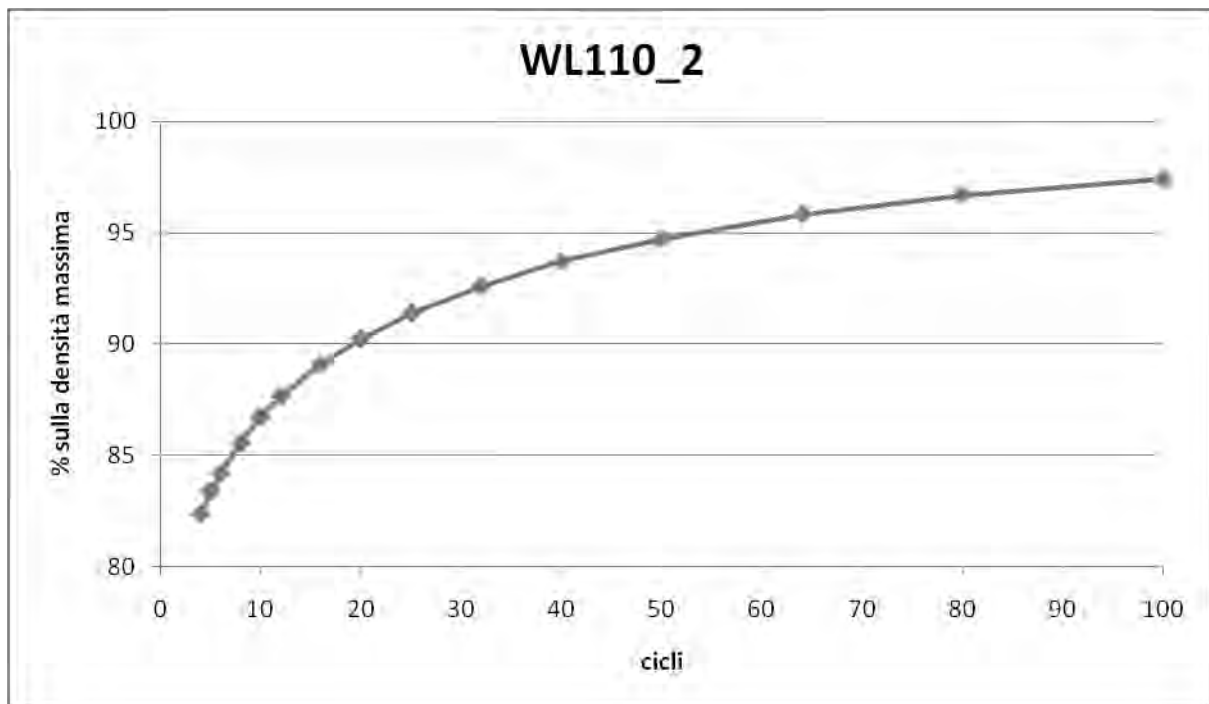


Figura 14.2 Grafico grado compattazione WL110_2

WL110_3

Cicli	bulk density [Mg/m ³]	% sulla densità massima
4	2070,54	82,16
5	2097,05	83,22
6	2118,07	84,05
8	2153,72	85,47
10	2182,06	86,59
12	2205,83	87,53
16	2242,40	88,98
20	2270,73	90,11
25	2299,07	91,23
32	2330,15	92,47
40	2356,66	93,52
50	2383,17	94,57
64	2410,60	95,66
80	2433,45	96,57
100	2454,48	97,40

Tabella 14.3. Grado compattazione WL110_3

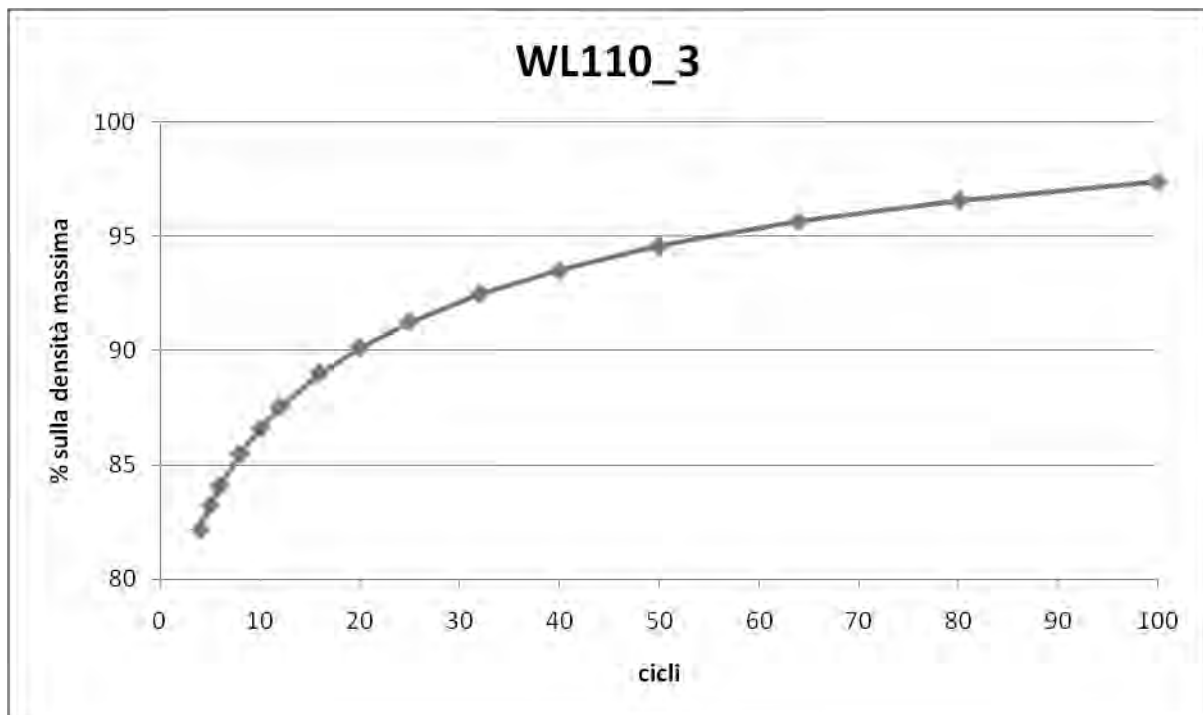


Figura 14.3 Grafico grado compattazione WL110_3

WL110_4

Cicli	bulk density [Mg/m ³]	% sulla densità massima
4	2107,69	83,64
5	2132,84	84,64
6	2154,41	85,49
8	2188,54	86,85
10	2216,40	87,95
12	2239,75	88,88
16	2276,59	90,34
20	2304,44	91,45
25	2333,19	92,59
32	2362,84	93,76
40	2387,99	94,76
50	2410,45	95,65
64	2432,02	96,51
80	2446,39	97,08
100	2454,48	97,40

Tabella 14.4. Grado compattazione WL110_4

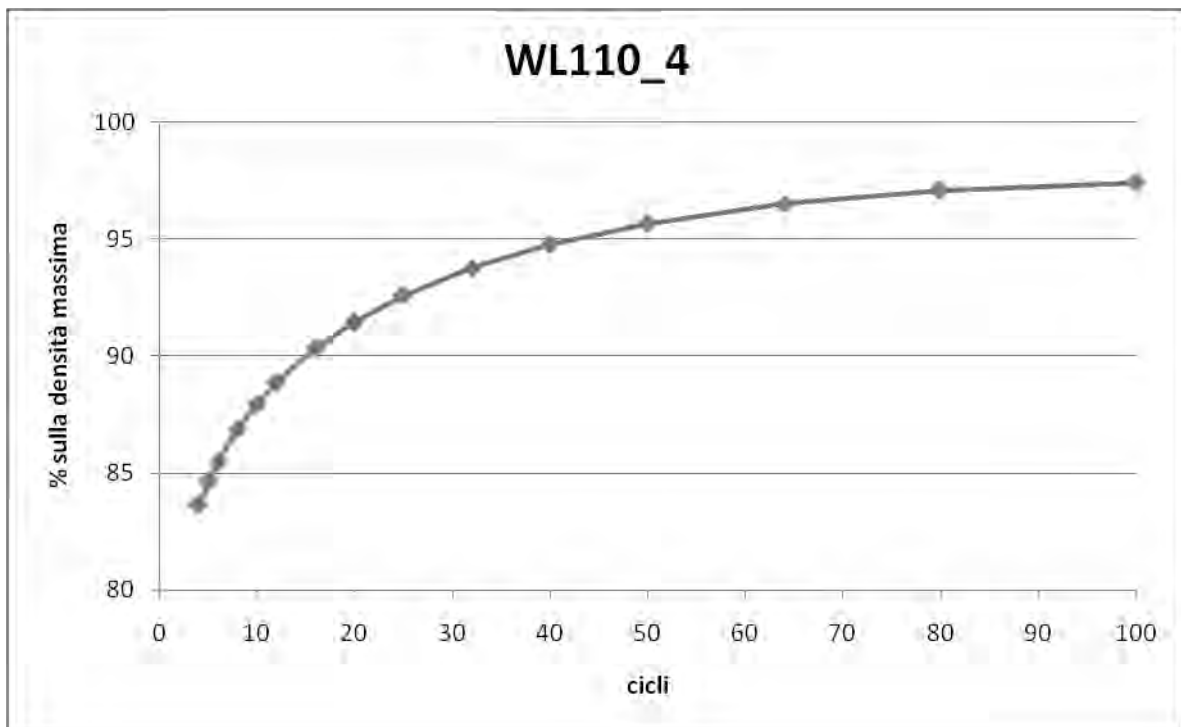


Figura 14.4 Grafico grado compattazione WL110_4

14.2. GRADO COMPATTAZIONE WS110

WS110_1

Cicli	bulk density [Mg/m ³]	% sulla densità massima
4	2339,36	82,52
5	2369,42	83,58
6	2393,10	84,41
8	2434,10	85,86
10	2465,07	86,95
12	2491,49	87,88
16	2533,39	89,36
20	2565,28	90,49
25	2597,16	91,61
32	2629,95	92,77
40	2659,11	93,80
50	2687,35	94,79
64	2715,59	95,79
80	2739,27	96,62
100	2760,22	97,36

Tabella 14.5. Grado compattazione WS110_1

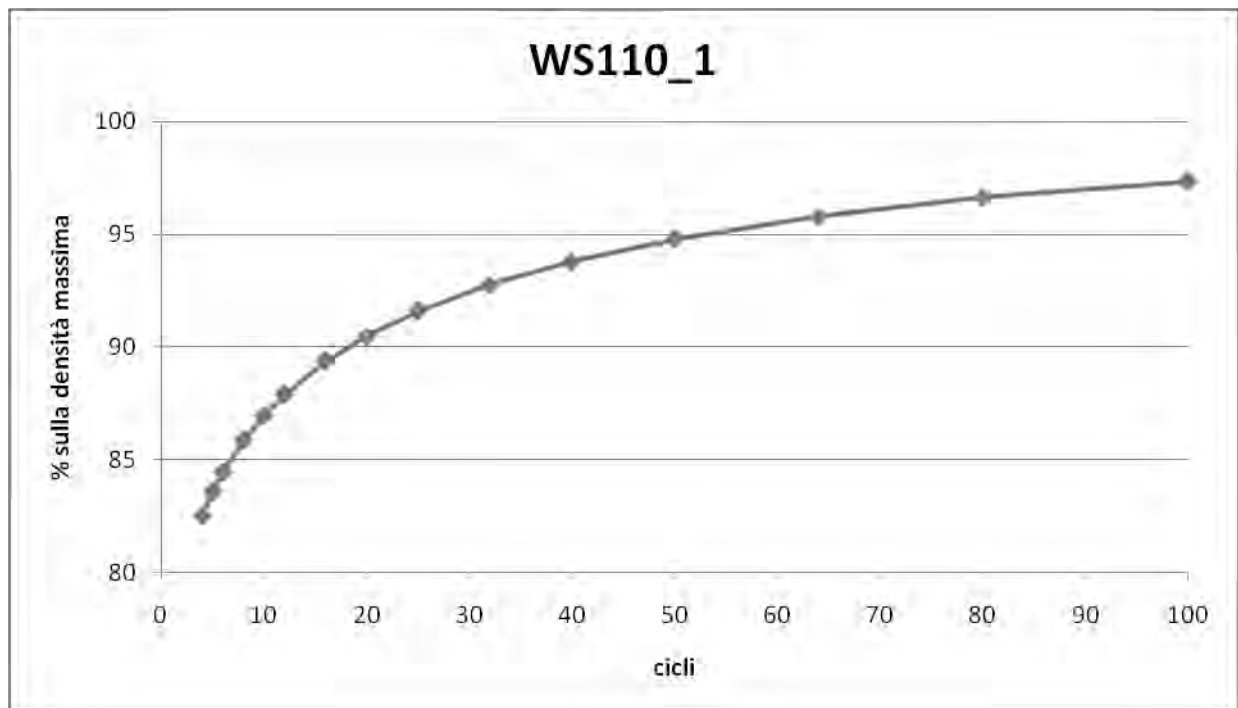


Figura 14.5 Grafico grado compattazione WS110_1

WS110_2

Cicli	bulk density [Mg/m ³]	% sulla densità massima
4	2351,74	82,95
5	2379,03	83,92
6	2403,60	84,78
8	2442,72	86,16
10	2472,74	87,22
12	2499,12	88,15
16	2540,06	89,60
20	2571,90	90,72
25	2601,92	91,78
32	2635,59	92,97
40	2663,79	93,96
50	2691,08	94,92
64	2718,37	95,89
80	2740,21	96,66
100	2760,22	97,36

Tabella 14.6. Grado compattazione WS110_2

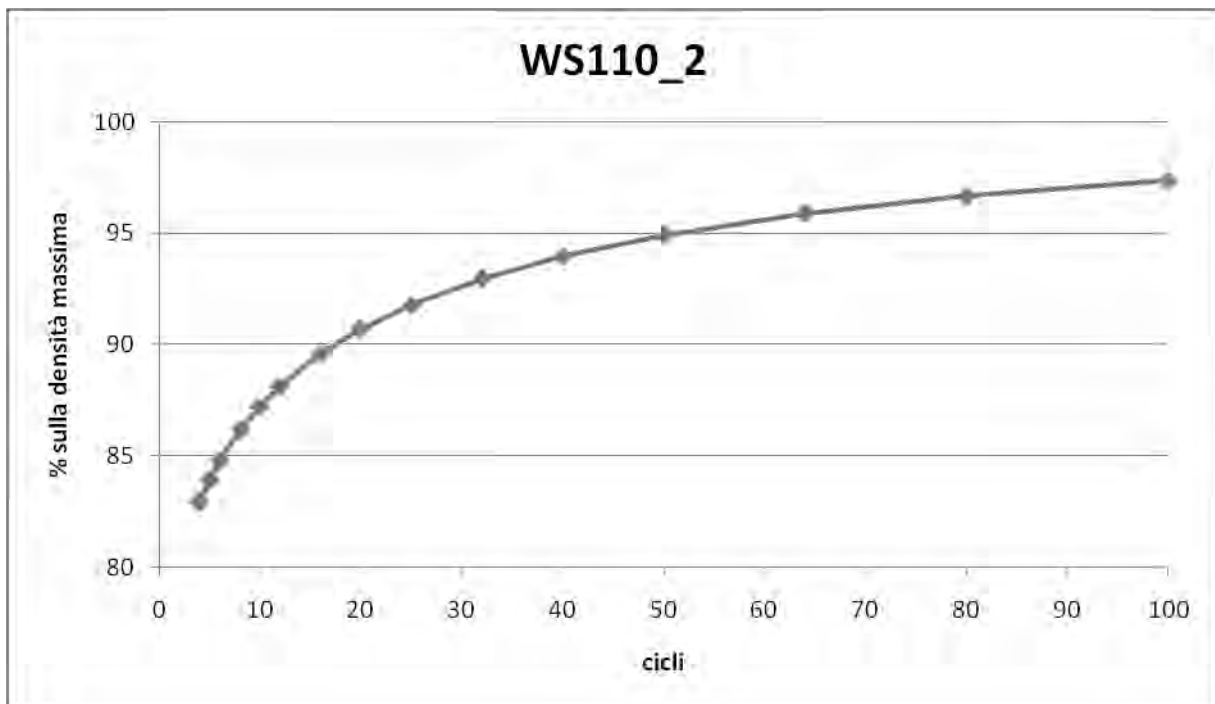


Figura 14.6 Grafico grado compattazione WS110_2

WS110_3

Cicli	bulk density [Mg/m ³]	% sulla densità massima
4	2348,51	82,84
5	2377,59	83,87
6	2402,13	84,73
8	2441,21	86,11
10	2473,93	87,26
12	2500,29	88,19
16	2541,19	89,64
20	2573,00	90,76
25	2602,99	91,82
32	2636,62	93,00
40	2664,79	94,00
50	2692,06	94,96
64	2719,32	95,92
80	2741,14	96,69
100	2760,22	97,36

Tabella 14.7. Grado compattazione WS110_3

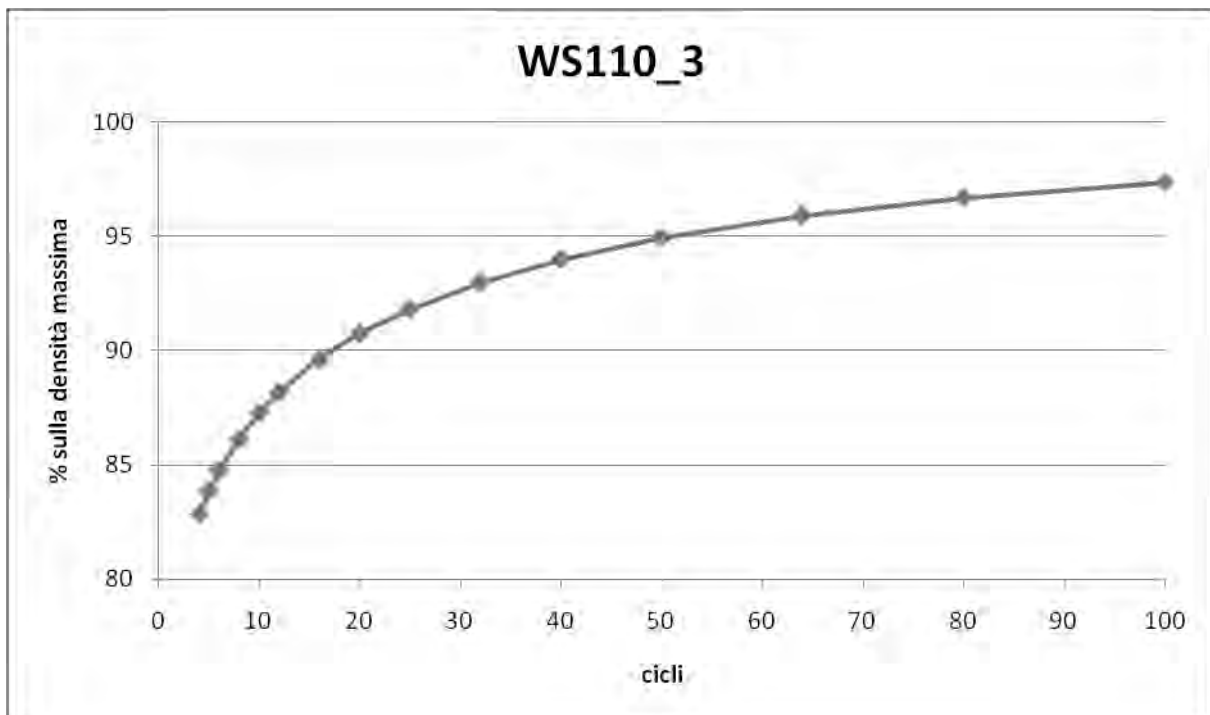


Figura 14.7 Grafico grado compattazione WS110_3

WS110_4

Cicli	bulk density [Mg/m ³]	% sulla densità massima
4	2355,37	83,08
5	2384,16	84,10
6	2408,45	84,95
8	2448,93	86,38
10	2481,32	87,52
12	2507,41	88,44
16	2548,80	89,90
20	2581,19	91,05
25	2611,78	92,13
32	2645,06	93,30
40	2672,95	94,28
50	2698,14	95,17
64	2723,34	96,06
80	2743,13	96,76
100	2760,22	97,36

Tabella 14.8. Grado compattazione WS110_4

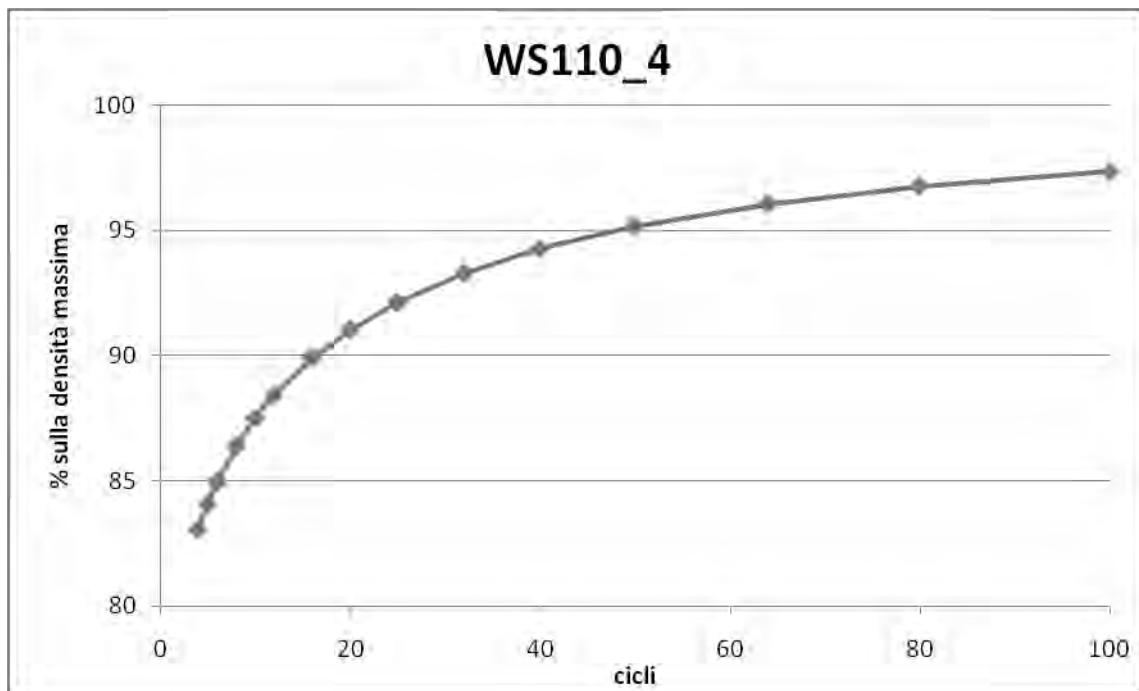


Figura 14.8 Grafico grado compattazione WS110_4

14.3. COMPARAZIONE DEL GRADO DI COMPATTAZIONE

Costruite tutte le curve di compattazione in funzione della massima densità raggiungibile per ogni singolo provino, viene costruito un grafico per mettere a confronto i diversi gradi di compattazione di entrambe le miscele. Per costruire entrambe le curve si è fatto la media delle 4 curve relative al grado di compattazione per singola miscela.

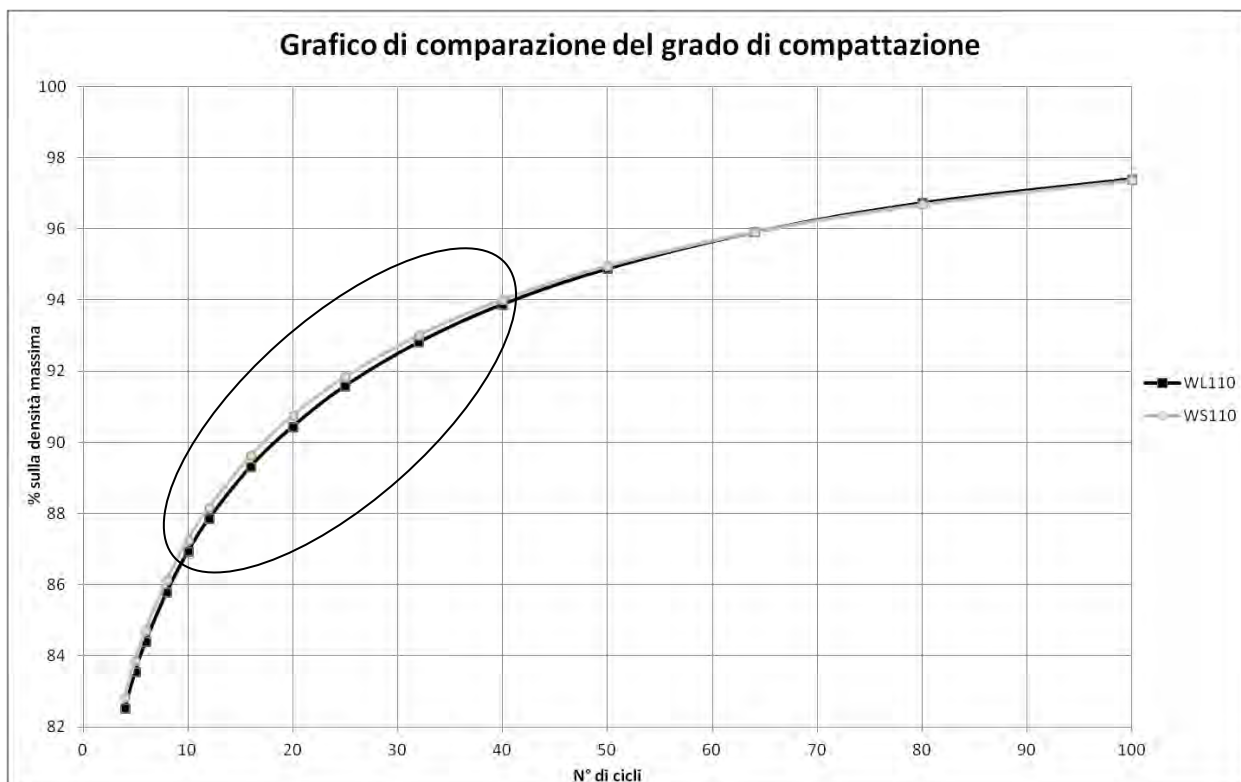


Figura 14.9 Grafico per la comparazione dei diversi gradi di compattazione di entrambe le miscele

Come si può notare, non c'è una sostanziale differenza tra le curve di compattazione. Entrambe tendono alla stessa percentuale di compattazione.

% media compattazione al 100esimo giro	
WL110	97,40
WS110	97,36

Qui non sembrerebbe esserci una sostanziale differenza tra le due miscele ma c'è da sottolineare una cosa: essendo questa curva rappresentativa della lavorabilità della miscela in fase di compattazione non si dovrebbe allora porre solamente attenzione alla massima percentuale d'addensamento di entrambe le miscele ma tenere in considerazione anche dell'energia richiesta per raggiungere la stessa percentuale finale. In altre parole le due curve discostano (anche se pur minimamente) l'una dall'altra dal decimo giro di pressa fino a circa 50esimo ciclo, come raffigurato in Figura 14.9.

Dopo di che le curve tendono ovviamente a sovrapporsi. In questo range di cicli appena citati, a parità di giri della pressa, la miscela WS contenente le scorie tenderebbe ad agevolare la fase di lavorazione quindi chiederebbe meno dispendio energetico rispetto a un conglomerato preparato con calcare, anche se pur con leggere differenze. Dallo studio dei vuoti questo non si direbbe essendo molto simili tra loro. Per quantificare questa differenza tra la miscela WS dalla WL nella prima fase della curva di compattazione si fa riferimento all'indice CEI.

14.4. INDICE CEI

Come già accennato, si possono dedurre delle teorie relative alla lavorabilità della miscela tramite dei parametri a partire dai dati forniti dalla pressa giratoria. Quindi, in base alla curva di compattazione si può in un primo tempo riconoscere se la miscela sia lavorabile o meno. Un indice fondamentale per l'analisi della lavorabilità della miscela è l'indice CEI.

Il CEI, ovvero Compaction Energy Index (Indice dell'energia di compattazione), è stato introdotto nel 1998 e permette di dedurre l'energia di compattazione in seguito ai risultati della pressa giratoria. Esso viene definito come il valore dell'area contenuta dall'ottavo giro compiuto dalla pressa fino al raggiungimento del 92% della densità massima sull'asse delle ordinate. Il CEI simula quindi il lavoro compiuto dalla pressa compattatrice per raggiungere la densità della miscela massima in fase di costruzione. Per ricavarlo bisogna fare riferimento alle curve di compattazione ricavate dalla pressa giratoria: modificandole opportunamente come eseguito in precedenza (paragrafo 14), è possibile ottenere sull'asse delle ordinate il rapporto della densità stimata ai vari giri della macchina sulla densità massima, mantenendo sull'asse delle ascisse il numero di cicli compiuti dalla pressa.

Si è fissato il numero di otto giri per simulare lo sforzo applicato da una tipica finitrice durante il processo di stesa della miscela, mentre si è scelto il 92% della densità massima poiché è il valore minimo che deve essere raggiunto al compimento della sovrastruttura e alla sua apertura al traffico. Le miscele con valore basso dell'indice sono maggiormente lavorabili e per questo sono auspicabili: infatti dal momento che tale indice dà un'idea della facilità con cui la miscela viene stesa, più è basso tale valore, più facilmente avviene la sua compattazione. Tuttavia non è bene che sia troppo ridotto: potrebbe essere il segnale di un conglomerato tenero e pertanto deve essere evitato.

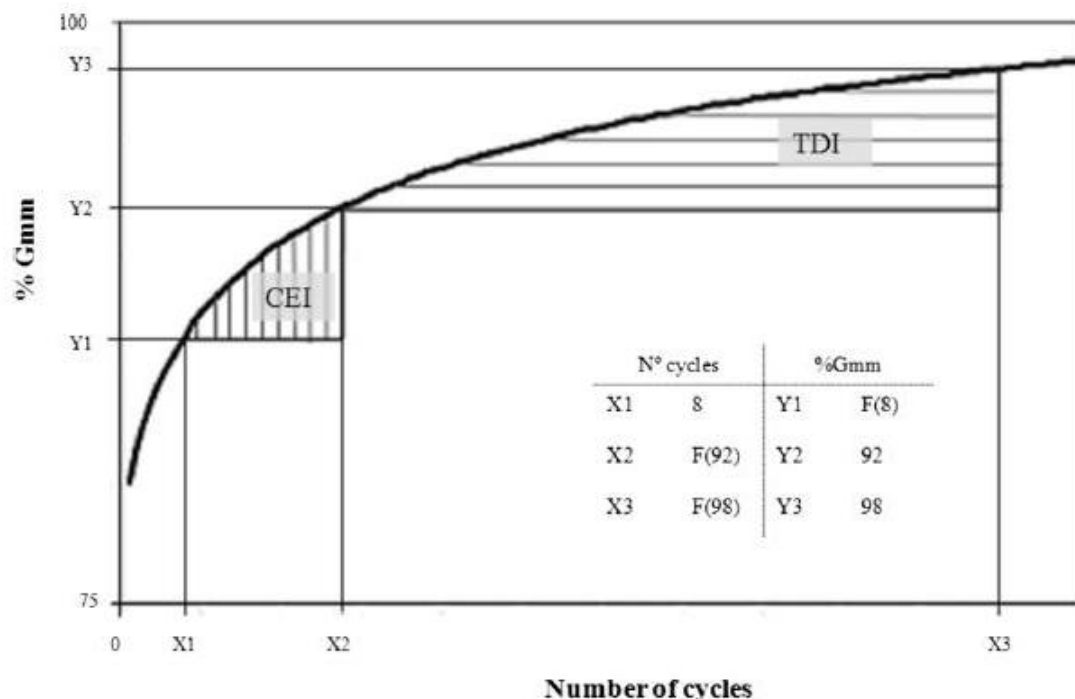


Figura 14.10 Indice CEI e TDI ricavati dalla curva di compattazione

Come visibile dalla Figura 14.10 è possibile ricavare due indici: il CEI e il TDI.

Mentre si è già vista la definizione del CEI, il TDI è un ulteriore indice di fondamentale importanza. Esso è correlato alla possibilità che vi sia un'ulteriore compattazione del conglomerato dovuta agli effetti del traffico ed è determinato dall'area compresa tra il 92% e il 98% della densità massima raggiunta dal provino. Quest'ultimo valore viene inteso come valore critico per il quale la miscela si sta avvicinando alla zona di rottura plastica. Miscele con valori elevati di TDI sono maggiormente desiderabili poiché significa che sono in grado di supportare più traffico nell'arco della loro vita. Durante lo sviluppo della tesi non si è fatto riferimento all'indice TDI ma solamente al CEI essendo un dato molto significati nei primi momenti di compattazione della miscela. Infatti, come visto in Figura 14.9, le curve di entrambe le miscele si discostano. Il TDI sarebbe stato superfluo avendo praticamente entrambe le curve sovrapposte e quindi tendenti allo stesso grado di compattazione da circa al cinquantesimo ciclo fino a quello finale.

14.4.1. CALCOLO INDICE CEI

Di seguito vengono elencati gli indici CEI dei singoli provini per entrambe le miscele. Per la determinazione, oltre aver fatto riferimento dall'ottavo ciclo relativo al raggiungimento del 92% del grado di compattazione, si è calcolata l'area CEI suddividendo le singole aree sottostanti alla curva di compattazione, denominandole A1, A2 ecc. .L'indice CEI è quindi la somma delle aree.

WL110_1

n° cicli	Grado di compattazione [%]	Area di riferimento	Valore Area	CEI [Σ aree]
8	85,24	A1	1,12	89,33
10	86,37	A2	3,19	
12	87,31	A3	11,32	
16	88,84	A4	16,62	
20	89,96	A5	26,49	
25	91,12	A6	30,58	
29,84	92,00			

WL110_2

n° cicli	Grado di compattazione [%]	Area di riferimento	Valore Area	CEI [Σ aree]
8	85,60	A1	1,15	79,17
10	86,75	A2	3,20	
12	87,65	A3	11,15	
16	89,12	A4	16,34	
20	90,24	A5	26,09	
25	91,39	A6	21,24	
28,48	92,00			

WL110_3

n° cicli	Grado di compattazione [%]	Area di riferimento	Valore Area	CEI [Σ aree]
8	85,47	A1	1,12	84,62
10	86,59	A2	3,19	
12	87,53	A3	11,17	
16	88,98	A4	16,32	
20	90,11	A5	26,03	
25	91,23	A6	26,78	
29,35	92,00			

WL110_4

n° cicli	Grado di compattazione [%]	Area di riferimento	Valore Area	CEI [Σ aree]
8	86,85	A1	1,11	43,32
10	87,95	A2	3,14	
12	88,88	A3	11,05	
16	90,34	A4	16,19	
20	91,45	A5	11,84	
22,43	92,00			

Tabelle 14.9 Calcoli per la determinazione dell'indice CEI per provini WL110

WS110_1

n° cicli	Grado di compattazione [%]	Area di riferimento	Valore Area	CEI [Σ aree]
8	85,86	A1	1,09	71,48
10	86,95	A2	3,12	
12	87,88	A3	11,05	
16	89,36	A4	16,26	
20	90,49	A5	25,95	
25	91,61	A6	14,01	
27,36	92,00			

WS110_2

n° cicli	Grado di compattazione [%]	Area di riferimento	Valore Area	CEI [Σ aree]
8	86,16	A1	1,06	63,84
10	87,22	A2	3,05	
12	88,15	A3	10,85	
16	89,60	A4	15,98	
20	90,72	A5	25,43	
25	91,78	A6	7,47	
26,31	92,00			

WS110_3

n° cicli	Grado di compattazione [%]	Area di riferimento	Valore Area	CEI [Σ aree]
8	86,11	A1	1,15	64,14
10	87,26	A2	3,24	
12	88,19	A3	11,22	
16	89,64	A4	16,35	
20	90,76	A5	25,89	
25	91,82	A6	6,29	
26,08	92,00			

WS110_4

n° cicli	Grado di compattazione [%]	Area di riferimento	Valore Area	CEI [Σ aree]
8	86,38	A1	1,14	54,60
10	87,52	A2	3,21	
12	88,44	A3	11,17	
16	89,90	A4	16,38	
20	91,05	A5	22,70	
24,42	92,00			

Tablelle 14.10 Calcoli per la determinazione dell'indice CEI per provini WS110

Se si dovesse graficare il valore medio del CEI per tipologia di miscela si otterrebbe il seguente grafico:

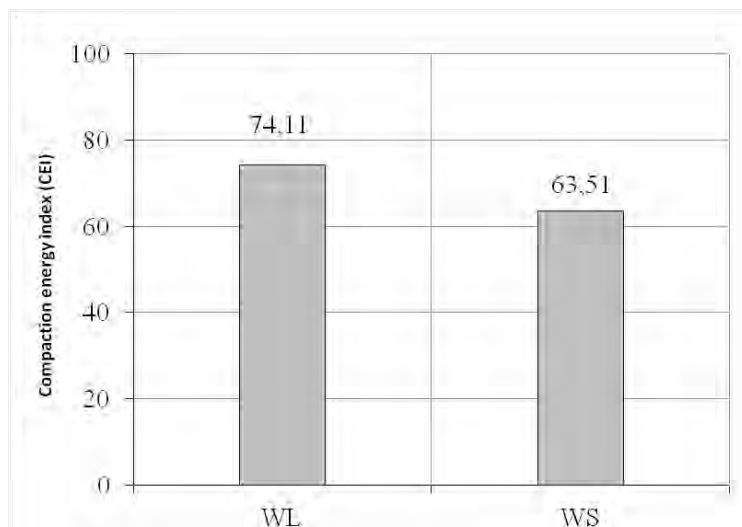


Tabella 14.11 Indice CEI medio per miscela

La Tabella 14.11 conferma quanto visto nella Figura 14.9: l'indice CEI della miscela WS preparata col 40% di scorie e 60% di calcare è più basso rispetto a quello della miscela col solo calcare. Come già accennato, un indice CEI inferiore è sinonimo di minor energia di compattazione quindi traducibile in una migliore lavorabilità della miscela con le scorie rispetto a quella col calcare. La miscela WS quindi si compatta meglio (anche se le differenze con la miscela WL sono leggere): a parità di cicli, il WS tende a richiedere una minor energia di compattazione per raggiungere la percentuale dei vuoti della miscela stimata. Ecco infatti perché il CEI viene calcolato dall'ottavo ciclo al raggiungimento del 92% della densità assoluta dove il restante 8% è la percentuale dei vuoti presenti nella miscela.

In definitiva miscele con scorie sono più lavorabili rispetto a conglomerati con solo calcare.

15. RISULTATI DEL MODULO DI RIGIDEZZA A TRAZIONE INDIRETTA

Di seguito vengono esposti i risultati relativi alla determinazione del modulo di rigidezza tramite trazione indiretta. Si fa riferimento al paragrafo 10 dove viene esposta sia la normativa di riferimento sia la procedura per l'esecuzione della prova. I risultati saranno esposti per singolo provino comprensivi di moduli di entrambi i diametri e modulo finale medio.

15.1. MODULI RIGIDEZZA WL110

provino	modulo \varnothing_1 [MPa]	modulo \varnothing_2 [MPa]	media [MPa]
WL110_1A	4983	4939	4961
WL110_1B	4239	4390	4315
WL110_2A	4782	4557	4670
WL110_2B	4142	4073	4108
WL110_3A	4785	4368	4577
WL110_3B	4321	4035	4178
WL110_4A	5152	4851	5002
WL110_4B	5192	5038	5115

Tabella 15.1 Moduli di rigidezza dei provini WL110

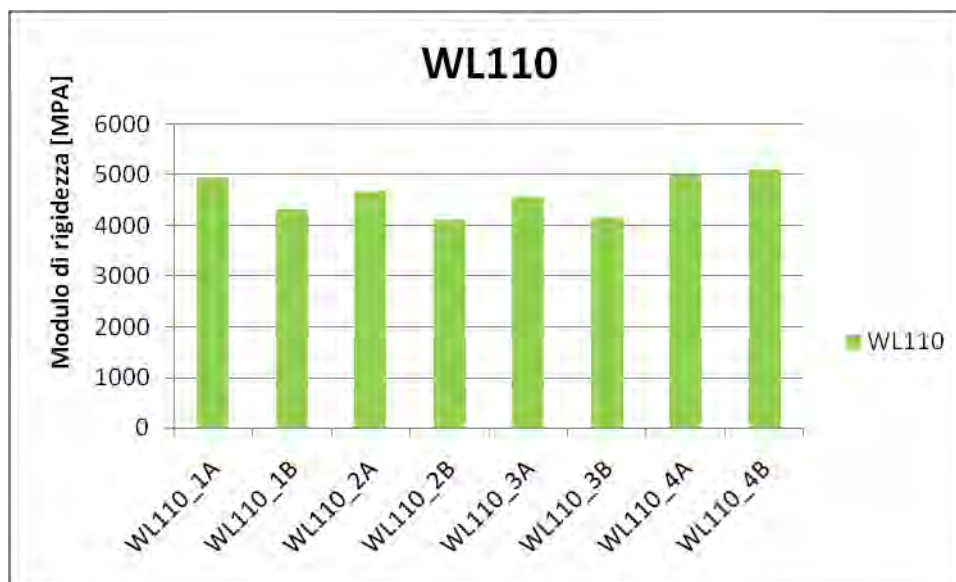


Tabella 15.2 Grafico dei vari moduli di rigidezza WL110

15.2. MODULI RIGIDEZZA WS110

provino	modulo \varnothing_1 [MPa]	modulo \varnothing_2 [MPa]	media [MPa]
WS110_1A	5534	5455	5495
WS110_1B	4261	4109	4185
WS110_2A	4271	4063	4167
WS110_2B	5012	5077	5045
WS110_3A	5193	4797	4995
WS110_3B	4963	4876	4920
WS110_4A	5214	5067	5141
WS110_4B	5200	5062	5131

Tabella 15.3 Moduli di rigidezza dei provini WS110



Tabella 15.4 Grafico dei vari moduli di rigidezza WS110

15.3. CONFRONTO TRA MODULI DI RIGIDEZZA E COMMENTI

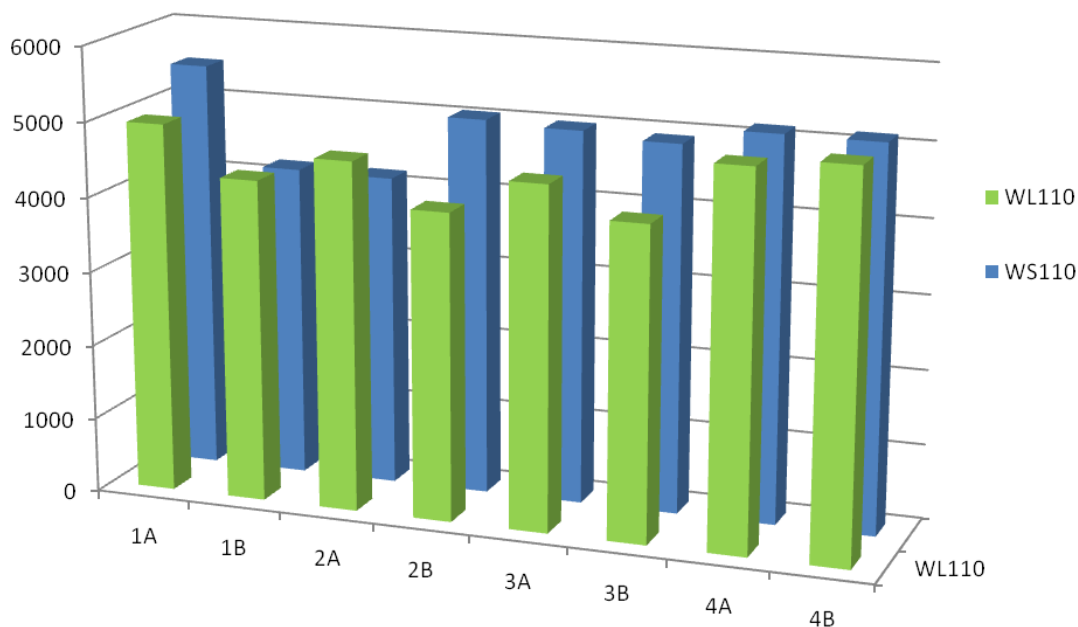


Figura 15.1 Grafico confronto tra i moduli delle diverse miscele

Quello che si dimostra nella Figura 15.1 è una rappresentazione visiva dei differenti moduli di rigidezza ottenuti tramite la Cooper Test.

Si nota come le scorie abbiano moduli di rigidezza leggermente migliori una volta confrontati alla miscela contenente solamente calcare. Le differenze tra tutti i 16 campioni studiati non sono notevoli però ugualmente il conglomerato bituminoso con le scorie presenta una miscela a matrice più rigida. Questo sicuramente è dovuto a una migliore rigidità della scoria a differenza del calcare.

Il modulo di rigidezza però può dipendere anche dallo scheletro litico del conglomerato. Dalle prove effettuate in laboratorio (paragrafo 6.2.5) è emerso un indice di forma e di appiattimento delle scorie inferiore a quello del calcare. Infatti per un'adeguata resistenza meccanica del conglomerato è necessario che l'indice di forma e di appiattimento degli aggregati abbia il valore più basso possibile.

Valori di indice di forma e appiattimento delle scorie inferiori a quelle del calcare inducono quindi a una migliore resistenza meccanica ovvero moduli di rigidezza maggiori.

Concludendo anche in questo caso i provini WS presentano una rigidezza superiore rispetto ai campioni WL.

16. RISULTATI DELLE DEFORMAZIONI PERMANENTI

Di seguito vengono esposti e commentati i risultati ottenuti dalla Cooper Test relativi alla determinazione delle deformazioni permanenti di 3 provini per miscela. Per la normativa di riferimento e la procedura d'esecuzione della prova, vedere il paragrafo 11.

Per lo studio e la comparazione dei risultati delle relative deformazioni permanenti per singolo provino, è stato costruito in un primo momento un grafico che mette in relazione i cicli di carico e le relative deformazioni accumulate. Poi, l'ultimo grafico comprende la media delle deformazioni per miscela. Per la media è stato scartato il provino che presentava una deformazione al 3600esimo impulso che maggiormente si discostava dalle altre due.

16.1. DEFORMAZIONI PERMANENTI WL110

WL110_1B

n° pulsazioni	deformazione [microstrain]
5	1269
10	1579
20	1779
30	1921
40	2048
50	2157
60	2248
70	2322
80	2388
100	2472
200	2897
300	3130
400	3308
500	3438
600	3533
700	3614
800	3687
900	3751
1000	3810
1100	3880
1200	3928
1300	4001
1400	4034
1500	4074
1600	4105
1700	4139
1800	4170
1900	4192
2000	4220
2100	4258
2200	4273
2300	4283
2400	4306
2500	4305
2600	4335
2700	4371
2800	4367
2900	4379
3000	4405
3100	4433
3200	4432
3300	4443
3400	4473
3500	4456
3600	4477

Tabella 16.1 n° Cicli e deformazioni

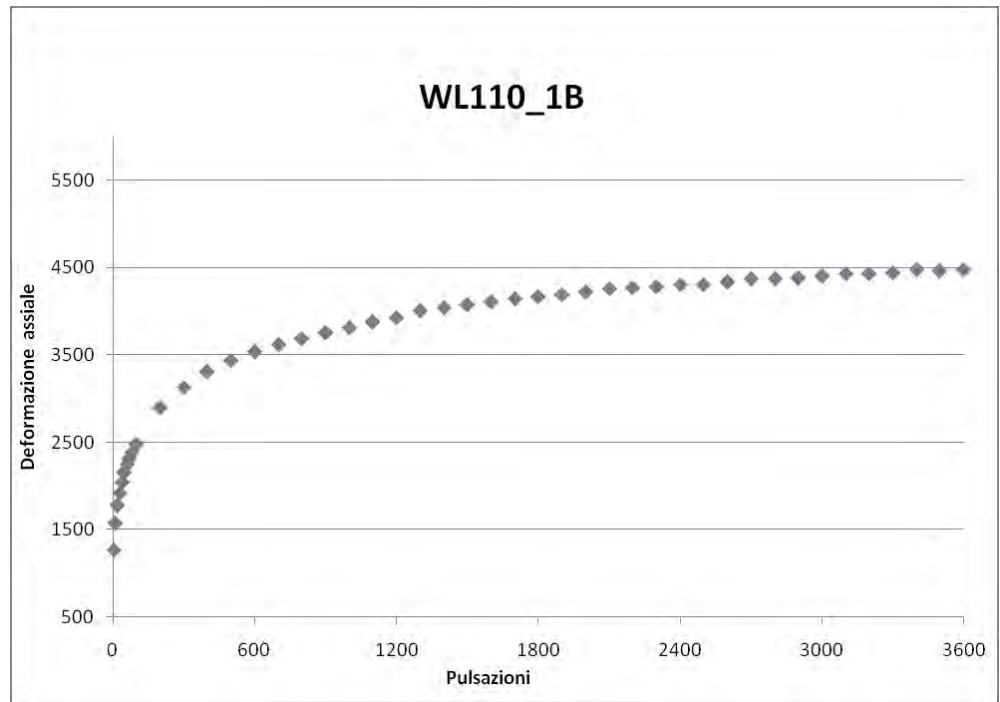


Figura 16.1 Curva del creep per provino WL110_1B

WL110_2B

n° pulsazioni	deformazione [microstrain]
5	1708
10	2082
20	2329
30	2524
40	2825
50	2882
60	2991
70	3074
80	3150
100	3225
200	3706
300	3957
400	4147
500	4287
600	4395
700	4485
800	4562
900	4630
1000	4696
1100	4734
1200	4795
1300	4837
1400	4876
1500	4908
1600	4938
1700	4963
1800	4986
1900	5026
2000	5035
2100	5065
2200	5103
2300	5134
2400	5141
2500	5171
2600	5196
2700	5200
2800	5236
2900	5253
3000	5256
3100	5267
3200	5292
3300	5312
3400	5309
3500	5350
3600	5349

Tabella 16.2 n° Cicli e deformazioni

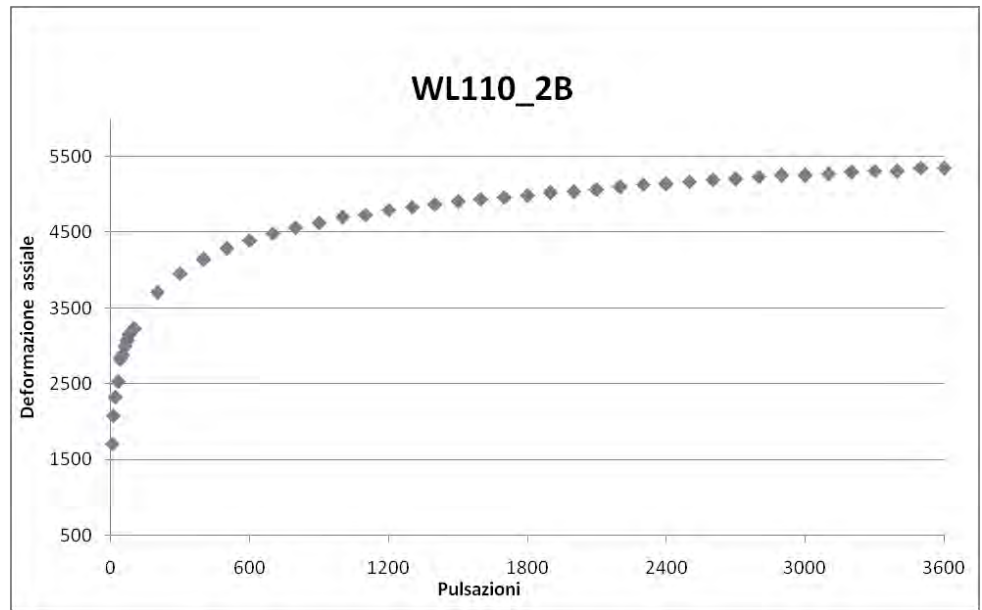


Figura 16.2 Curva del creep per provino WL110_2B

WL110_3B

n° pulsazioni	deformazione [microstrain]
5	914
10	1194
20	1381
30	1542
40	1652
50	1764
60	1864
70	1939
80	2007
100	2079
200	2514
300	2797
400	2965
500	3111
600	3232
700	3328
800	3411
900	3485
1000	3551
1100	3607
1200	3669
1300	3716
1400	3748
1500	3783
1600	3830
1700	3861
1800	3898
1900	3933
2000	3956
2100	4026
2200	4074
2300	4084
2400	4099
2500	4127
2600	4139
2700	4171
2800	4179
2900	4214
3000	4212
3100	4241
3200	4250
3300	4289
3400	4289
3500	4303
3600	4333

Tabella 16.3 n° Cicli e deformazioni

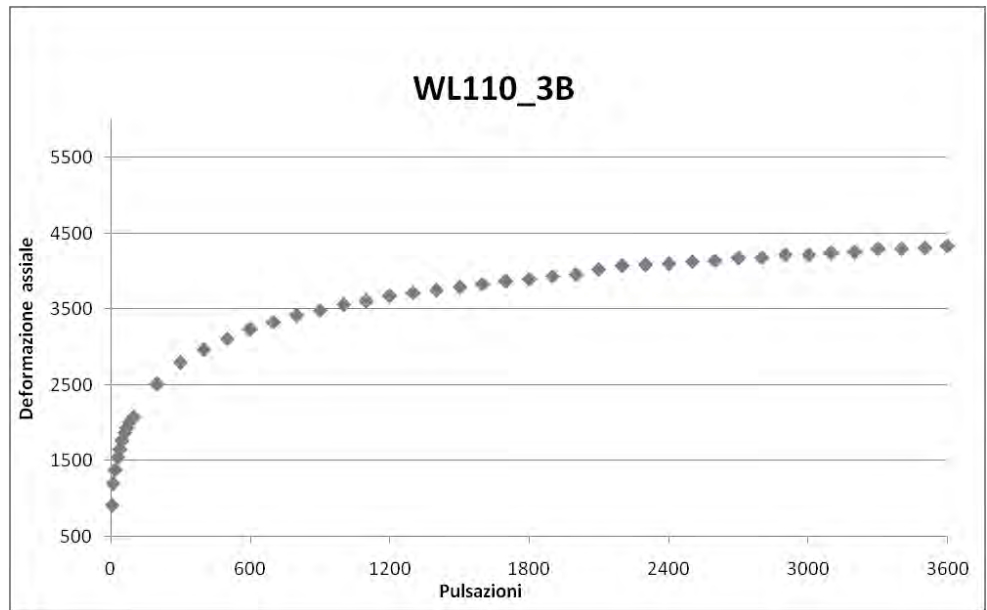


Figura 16.3 Curva del creep per provino WL110_3B

WL110_DEFORMAZIONE MEDIA DI 2 PROVINI

Al 3600esimo ciclo, la deformazione massima accumulata dai provini è pari a:

-WL110_1B: 4477 microstrain;

-WL110_2B: 5349 microstrain;

-WL110_3B: 4333 microstrain.

Per la media quindi si è tenuto conto dei provini WL110-1B e WL110_3B scartando di conseguenza il provino WL110_2B.

n° pulsazioni	deformazione [microstrain]
5	1092
10	1387
20	1580
30	1732
40	1850
50	1961
60	2056
70	2131
80	2198
100	2276
200	2706
300	2964
400	3137
500	3275
600	3383
700	3471
800	3549
900	3618
1000	3681
1100	3744
1200	3799
1300	3859
1400	3891
1500	3929
1600	3968
1700	4000
1800	4034
1900	4063
2000	4088
2100	4142
2200	4174
2300	4184
2400	4203
2500	4216
2600	4237
2700	4271
2800	4273
2900	4297
3000	4309
3100	4337
3200	4341
3300	4366
3400	4381
3500	4380
3600	4405

Tabella 16.4 n° Cicli e deformazioni

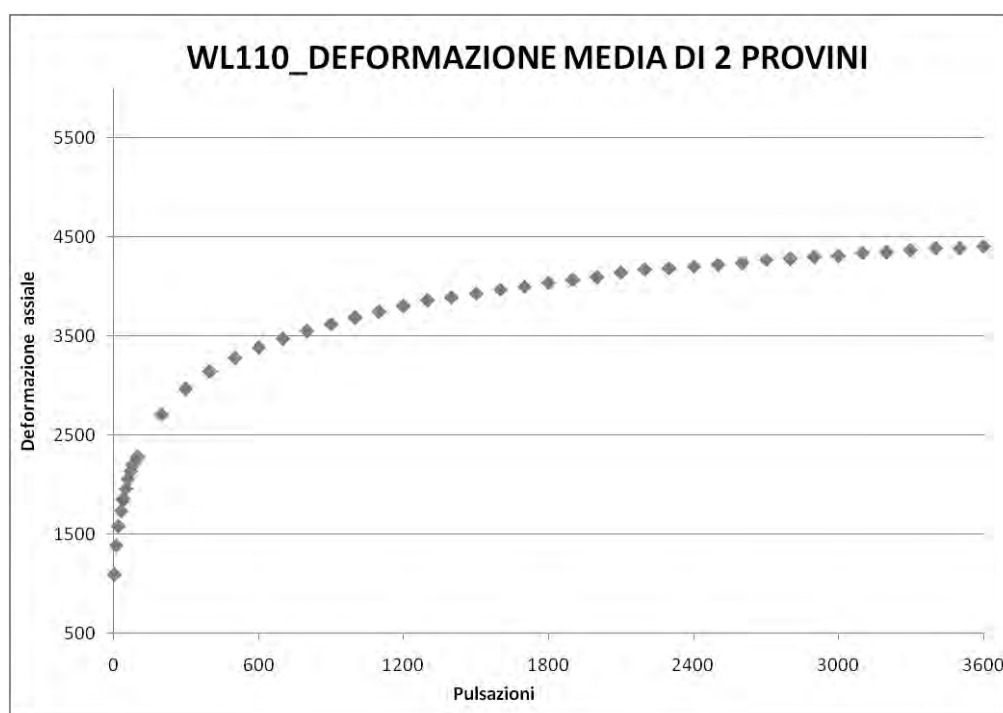


Figura 16.4 Curva del creep WL110 MEDIO

16.2. DEFORMAZIONI PERMANENTI WS110

WS110_2A

n° pulsazioni	deformazione [microstrain]
5	2853
10	3429
20	3804
30	4076
40	4310
50	4511
60	4665
70	4796
80	4908
100	5003
200	5699
300	6070
400	6329
500	6498
600	6661
700	6797
800	6903
900	6977
1000	7077
1100	7162
1200	7225
1300	7270
1400	7315
1500	7363
1600	7410
1700	7444
1800	7480
1900	7505
2000	7552
2100	7571
2200	7592
2300	7606
2400	7657
2500	7664
2600	7713
2700	7723
2800	7755
2900	7754
3000	7787
3100	7809
3200	7841
3300	7855
3400	7891
3500	7911
3600	7914

Tabella 16.5 n° Cicli e deformazioni

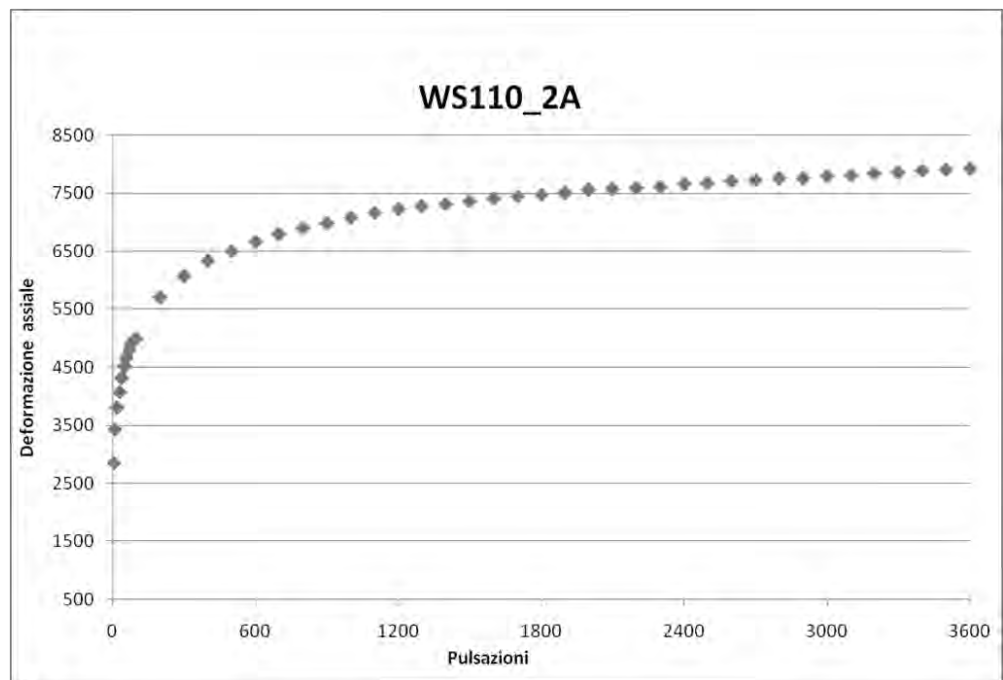


Figura 16.5 Curva del creep per provino WS110_2A

WS110_1B

n° pulsazioni	deformazione [microstrain]
5	1589
10	1935
20	2164
30	2348
40	2466
50	2573
60	2680
70	2750
80	2841
100	2945
200	3432
300	3748
400	3958
500	4147
600	4284
700	4463
800	4557
900	4663
1000	4753
1100	4822
1200	4897
1300	4958
1400	4992
1500	5052
1600	5086
1700	5131
1800	5153
1900	5194
2000	5235
2100	5258
2200	5300
2300	5316
2400	5344
2500	5376
2600	5389
2700	5419
2800	5436
2900	5487
3000	5511
3100	5525
3200	5541
3300	5561
3400	5591
3500	5601
3600	5629

Tabella 16.6 n° Cicli e deformazioni

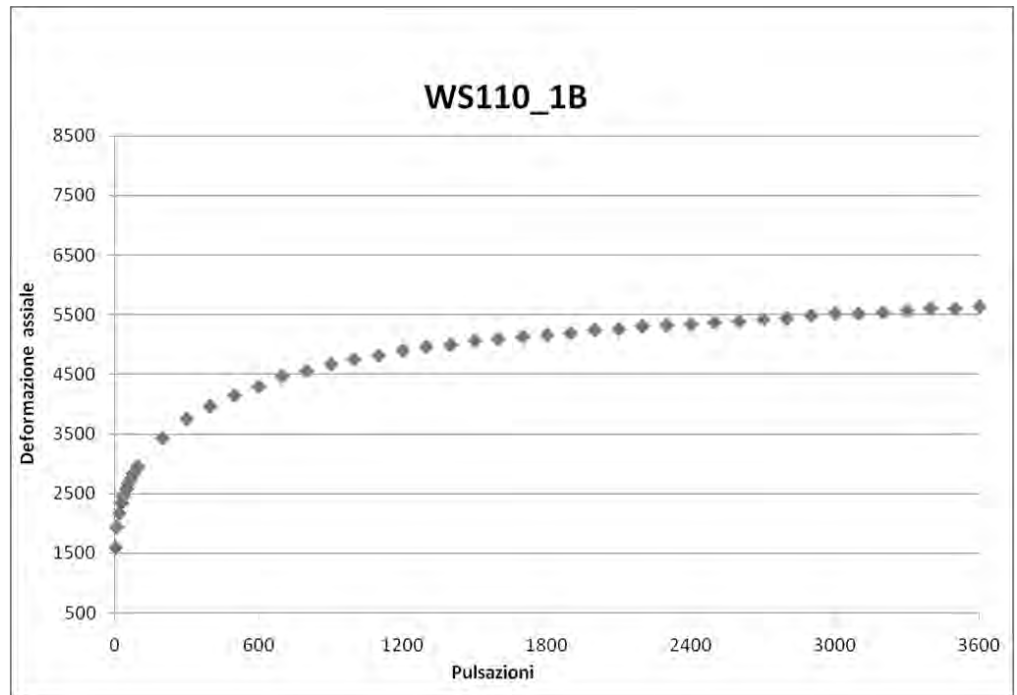


Figura 16.6 Curva del creep per provino WS110_1B

WS110_3B

n° pulsazioni	deformazione [microstrain]
5	2297
10	2697
20	2968
30	3177
40	3314
50	3441
60	3564
70	3642
80	3768
100	3816
200	4297
300	4559
400	4733
500	4875
600	4987
700	5050
800	5154
900	5220
1000	5255
1100	5319
1200	5346
1300	5416
1400	5450
1500	5461
1600	5505
1700	5540
1800	5594
1900	5607
2000	5623
2100	5661
2200	5667
2300	5697
2400	5712
2500	5746
2600	5772
2700	5796
2800	5814
2900	5835
3000	5834
3100	5864
3200	5881
3300	5883
3400	5906
3500	5895
3600	5933

Tabella 16.7 n° Cicli e deformazioni

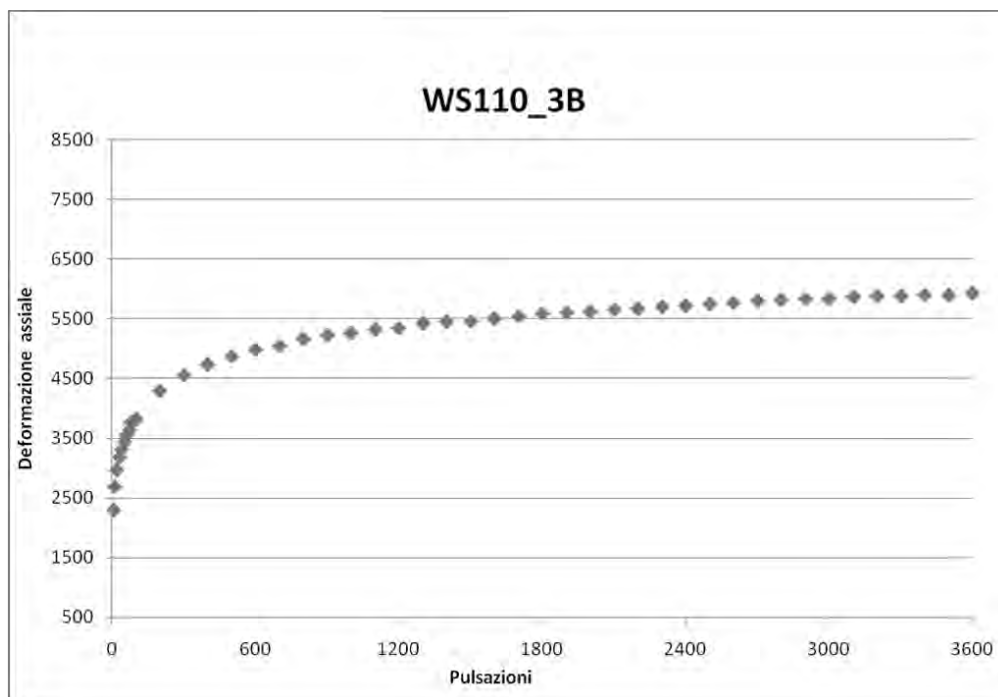


Figura 16.7 Curva del creep per provino WS110_3B

WS110_DEFORMAZIONE MEDIA DI 2 PROVINI

Al 3600esimo ciclo, la deformazione massima accumulata dai provini è pari a:

-WL110_2A: 7914 microstrain;

-WL110_1B: 5629 microstrain;

-WL110_3B: 5933 microstrain.

Per la media quindi si fatto riferimento ai provini WS110-1B e WS110_3B scartando di conseguenza il provino WL110_2A.

n° pulsazioni	deformazione [microstrain]
5	1943
10	2316
20	2566
30	2763
40	2890
50	3007
60	3122
70	3196
80	3305
100	3381
200	3865
300	4154
400	4346
500	4511
600	4636
700	4757
800	4856
900	4942
1000	5004
1100	5071
1200	5122
1300	5187
1400	5221
1500	5257
1600	5296
1700	5336
1800	5374
1900	5401
2000	5429
2100	5460
2200	5484
2300	5507
2400	5528
2500	5561
2600	5581
2700	5608
2800	5625
2900	5661
3000	5673
3100	5695
3200	5711
3300	5722
3400	5749
3500	5748
3600	5781

Tabella 16.8 n° Cicli e deformazioni

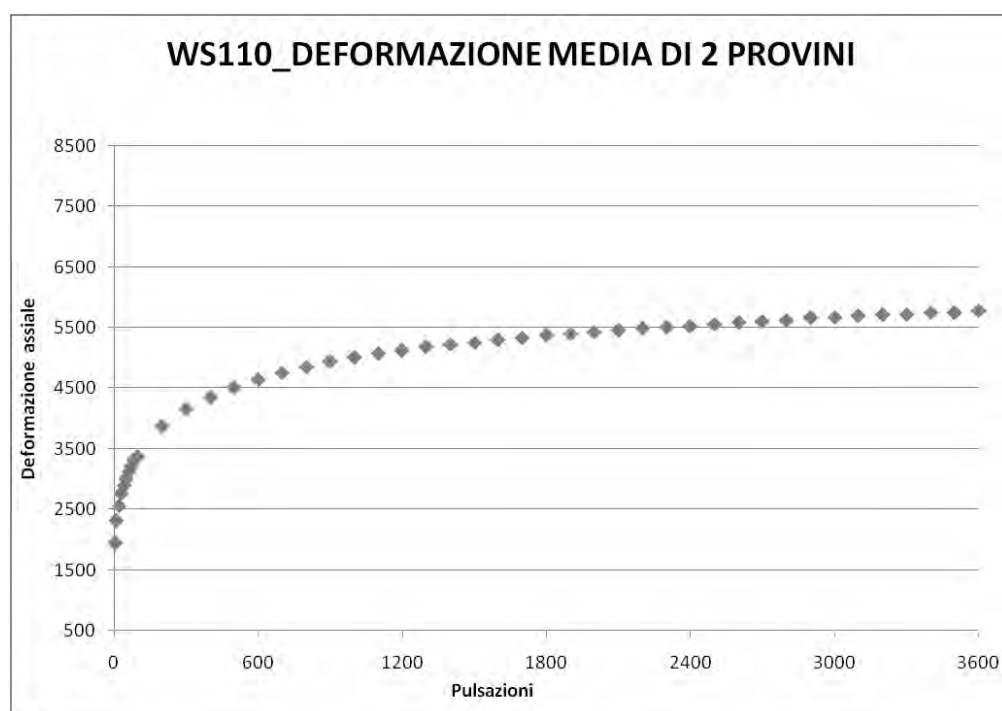


Figura 16.8 Curva del creep WS110 MEDIO

16.3. CONFRONTO DEFORMAZIONI PERMANENTI E COMMENTI

Vengono messe di seguito a confronto le miscele WL110 e WS110 utilizzando le medie di 2 provini per singola miscela, determinate al paragrafo 16.1 e paragrafo 16.2 :

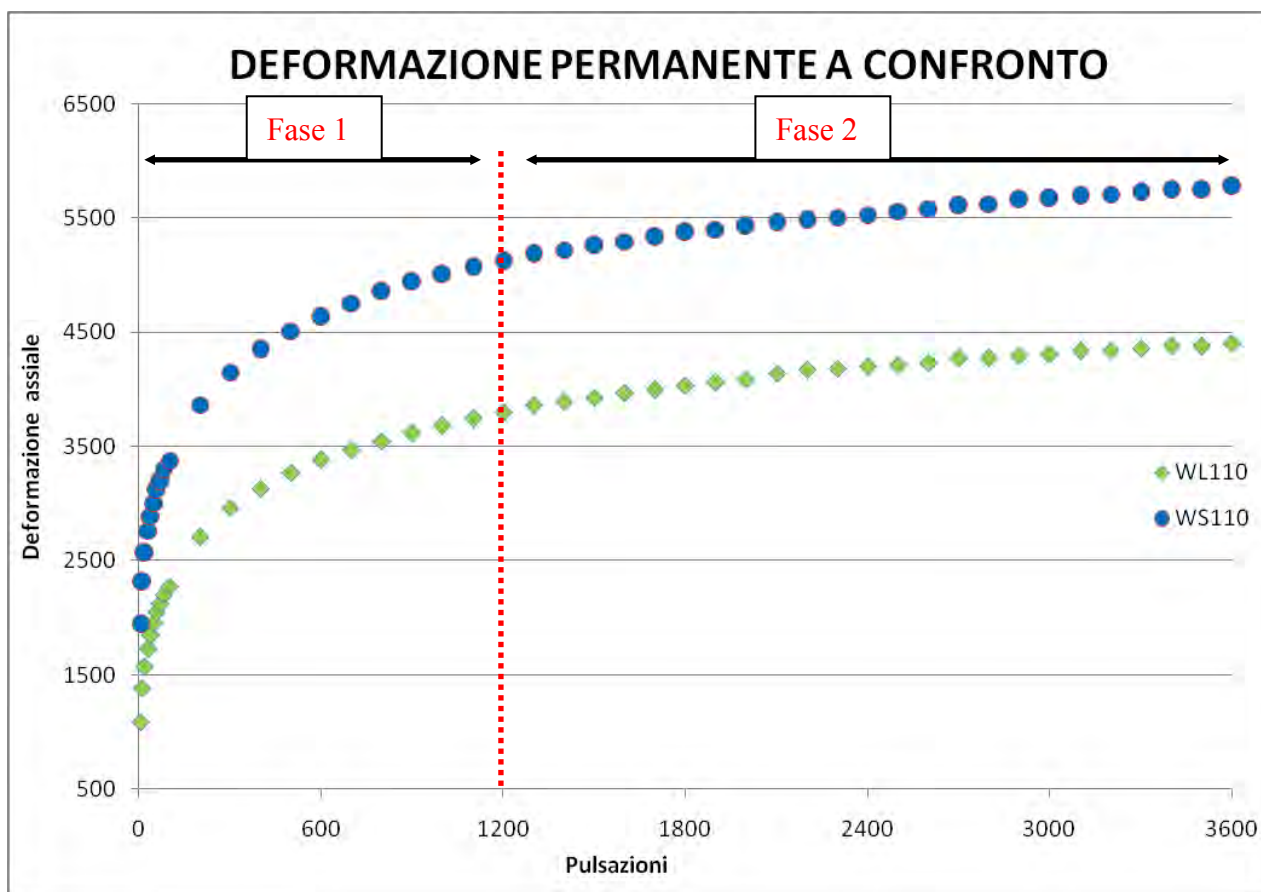


Figura 16.9 Confronto tra le medie di deformazioni permanenti di entrambe le miscele

Il grafico in Figura 16.9 mette in luce come la miscela WS110 abbia una tangente alla curva della deformazione molto simile a quella della miscela WL110 nel primo tratto (fase1), per poi stabilizzarsi entrambe con un angolo costante oltre i 1200 cicli fino a 3600 cicli (fase2).

In un primo momento le scorie sembrano penalizzare il conglomerato avendo valori di deformazioni massime decisamente maggiori: i WS110 raggiungono mediamente i 5781 microstrain, maggiori dei 4405 microstrain medi dei campioni WL110. Questo lascia dedurre a una diversa affinità chimica della scoria col bitume a differenza del calcare.

Comunque la più alta curva di deformazione permanente delle scorie è imputabile al fatto che la prima fase, rispetto ai provini WL110, è affetta da cedimenti diversi, che sono irrilevanti rispetto alle deformazioni che subirà il conglomerato durante la vita utile.

Oltre a questo, non si è interessati alla deformazione massima raggiunta ma piuttosto al creep rate. Il traffico e quindi le sue relative deformazioni incide su quest'ultima fase: il fattore rilevante è che il materiale testato, sia con il calcare sia con le scorie, ha un accumulo di deformazioni costante.

Quindi è bene progettare un materiale che abbia la pendenza della seconda fase la più bassa e lunga possibile quindi tendente all'orizzontale.

Per uno studio più dettagliato della velocità di accumulo delle deformazioni per entrambi i provini, è stata determinata l'equazione della retta che interpola i punti delle deformazioni dal 1200esimo ciclo al 3600esimo ciclo, dove la pendenza media (creep rate) della curva per entrambi i provini è piuttosto simile e quindi chiaramente all'interno della seconda fase di accumulo.

Il creep rate di ogni miscela della seconda fase è pari a:

WL110

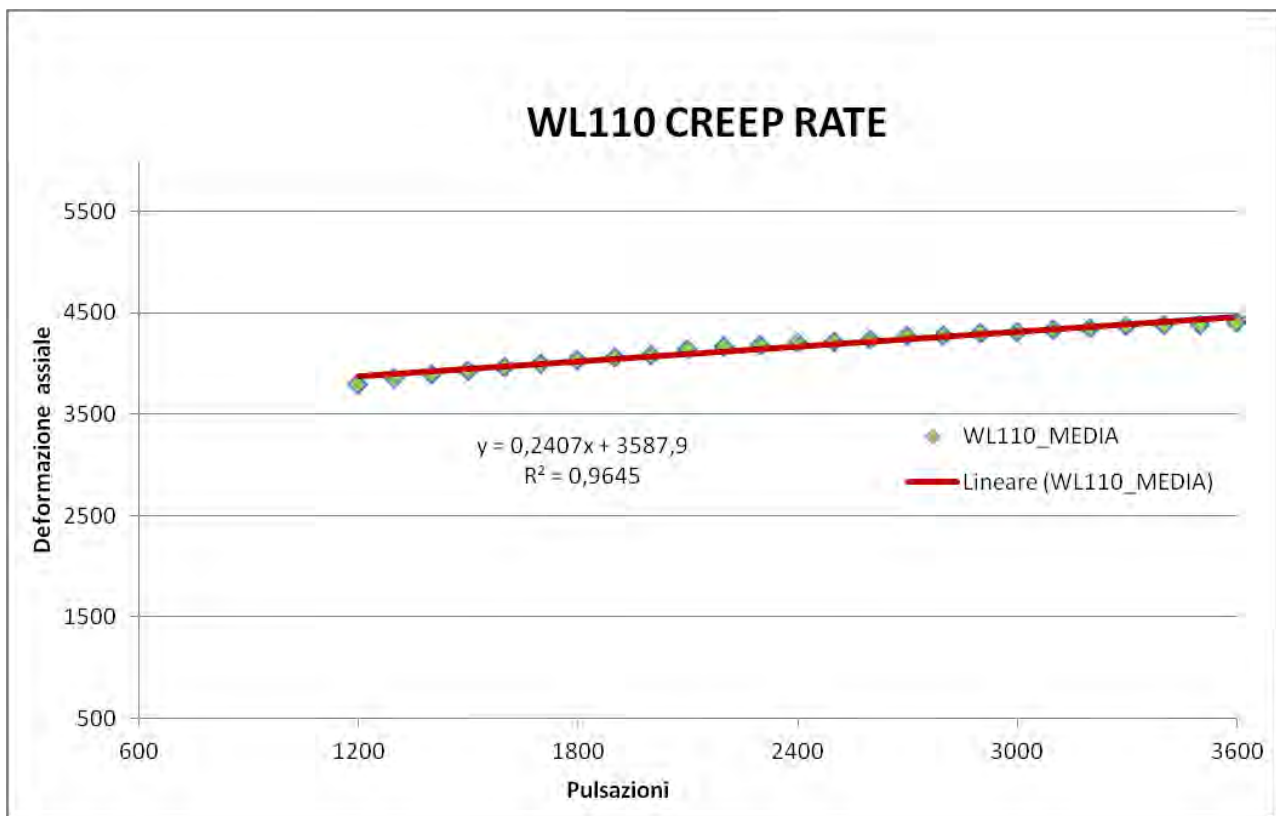


Figura 16.10 Creep rate della miscela WL110

L'equazione della retta è pari a:

$$y = 0,2407 x + 3587,9 \quad (16.1)$$

WS110

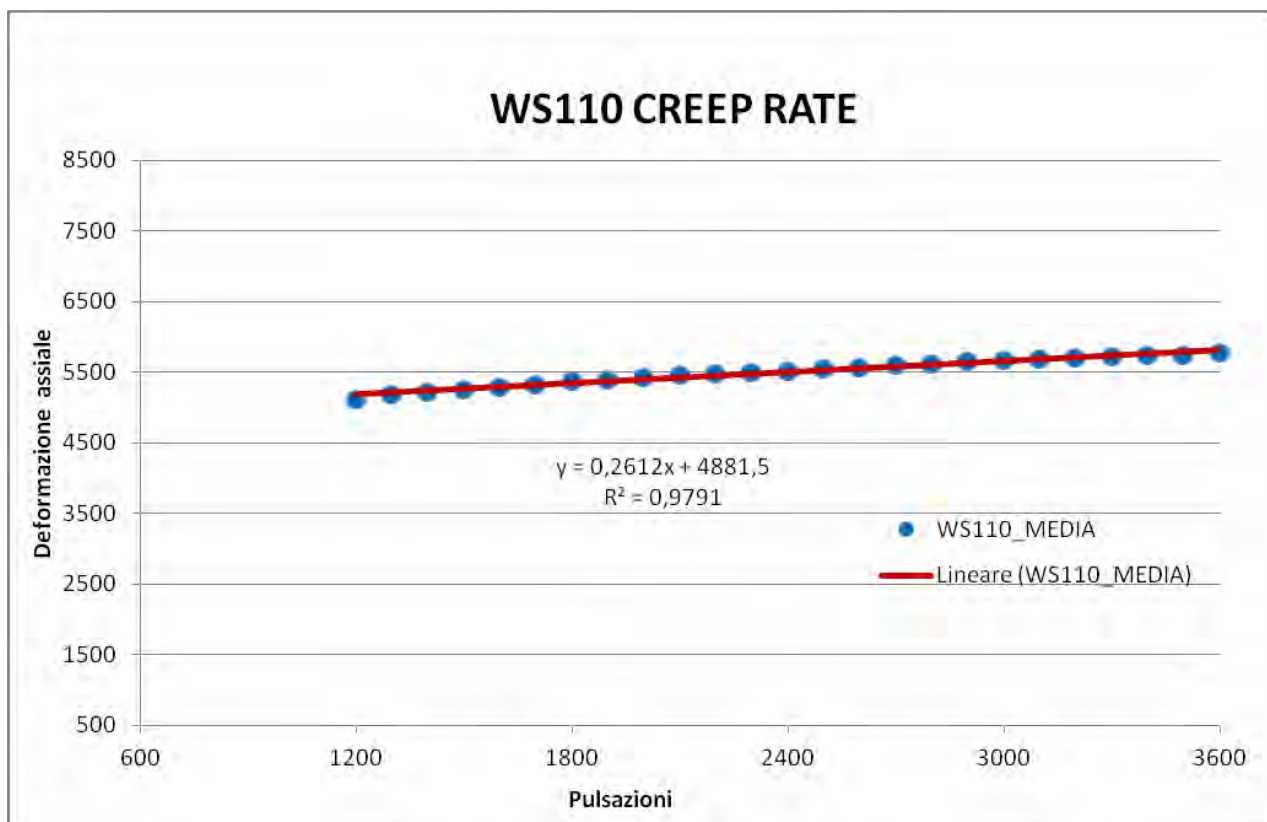


Figura 16.11 Creep rate della miscela WS110

L'equazione della retta è pari a:

$$y = 0,2612x + 4881,5 \quad (16.2)$$

Il creep rate di entrambi i provini quindi può essere riassunto nella tabella sottostante:

Provino	Creep rate
WL 110	0,2407
WS 110	0,2612

Il conglomerato con calcare WL110 presentando un creep rate inferiore quindi una pendenza della retta della seconda fase più tendente all'orizzontale rispetto al WS110, garantisce quindi un accumulo di deformazioni più lento. Si può quindi affermare che le scorie non penalizzano in modo vistoso le caratteristiche meccaniche del conglomerato bituminoso rispetto al caso di un campione preparato con calcare dato che il creep rate di entrambe le miscele è dello stesso ordine di grandezza.

17. RISULTATI DELLA PROVA A FATICA

Di seguito vengono esposti e commentati i risultati ottenuti dalla Cooper Test relativi alla prova a fatica in cui vengono testati 5 provini per miscela. Per la normativa di riferimento e la procedura d'esecuzione della prova, vedere il paragrafo 17.

I provini utilizzati con le rispettive tensioni di prova sono stati:

WL110

Provino	Tensione [kPa]	Modulo di rigidezza
WL110_3A	500	4576,5
WL110_1A	450	4961,0
WL110_2A	400	4669,5
WL110_4A	350	5001,5
WL110_4B	300	5115,0

Tabella 17.1 Provini WL110 per la prova a fatica

WS110

Provino	Tensione [kPa]	Modulo di rigidezza
WS110_3A	500	4995,0
WS110_2B	450	5044,5
WS110_4B	400	5131,0
WS110_4A	350	5140,5
WS110_1A	300	5494,5

Tabella 17.2 Provini WS110 per la prova a fatica

I provini sono stati scelti in modo tale da applicare una tensione maggiore al provino con modulo di rigidezza maggiore per poi ordinarli in modo decrescente. Il provino WL110_4A, a cui è stata applicata una tensione di 350kPa, ha avuto una prova a fatica con un numero di cicli non coerente con quanto appena descritto. Questa incongruenza è giustificabile dal fatto che è stato il primo provino per entrambe le miscele a essere testato quindi era stata applicata una tensione di prova di 350kPa per valutare a che tensioni a far lavorare i restanti provini.

Di seguito vengono riportati i risultati dei singoli provini con la tensione applicata e i relativi numero di impulsi che hanno portato a rottura il rispettivo provino. Per il calcolo della deformazione massima al centro del provino si è fatto riferimento alla formula:

$$\varepsilon_{x,\max} = \frac{\sigma_{x,\max} \times (1 + 3\nu)}{S_m} \times 1000 \quad (17.1)$$

Dove:

$\sigma_{x,\max}$ è la tensione massima al centro del provino (kPa);

ν è il modulo di Poisson (assunto pari a 0,35);

S_m è il modulo di rigidezza alla tensione $\sigma_{x,\max}$ (MPa).

17.1. RISULTATI PROVA FATICA WL110

n°provino	tensione [kPa]	modulo rigidezza [MPa]	deformazione max(microstrain)	n°cicli
WL110_3A	300	4576,5	134,38	64946
WL110_1A	350	4961,0	144,63	22261
WL110_2A	400	4669,5	175,61	15463
WL110_4A	450	5001,5	184,44	9974
WL110_4B	500	5115,0	200,39	4708

Tabella 17.3 Risultati prova a fatica per provini WL110

Graficando la massima deformazione orizzontale al centro del provino ($\varepsilon_{x,\max}$) in funzione del numero di cicli a rottura usando gli assi orizzontale e verticale logaritmici, si ottiene:

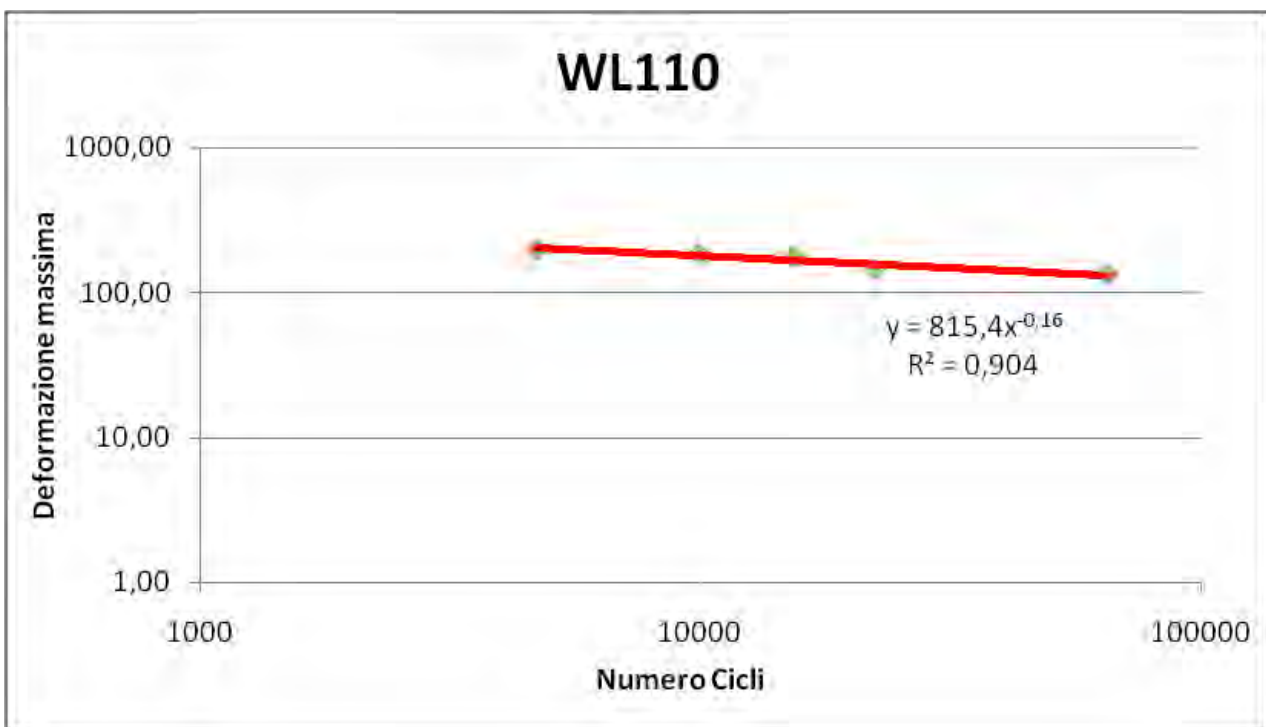


Figura 17.1 Grafico legge di fatica WL110

17.2. RISULTATI PROVA FATICA WS110

n°provino	tensione [kPa]	modulo rigidezza [MPa]	deformazione max(microstrain)	n°cicli
WS110_3A	300	4995,0	123,12	31842
WS110_2B	350	5044,5	142,23	15534
WS110_4B	400	5131,0	159,81	10878
WS110_4A	450	5140,5	179,46	7482
WS110_1A	500	5494,5	186,55	3051

Figura 17.2 Risultati prova a fatica per provini WS110

Graficando la massima deformazione orizzontale al centro del provino ($\varepsilon_{x,max}$) in funzione del numero di cicli a rottura usando gli assi orizzontale e verticale logaritmici, si ottiene:

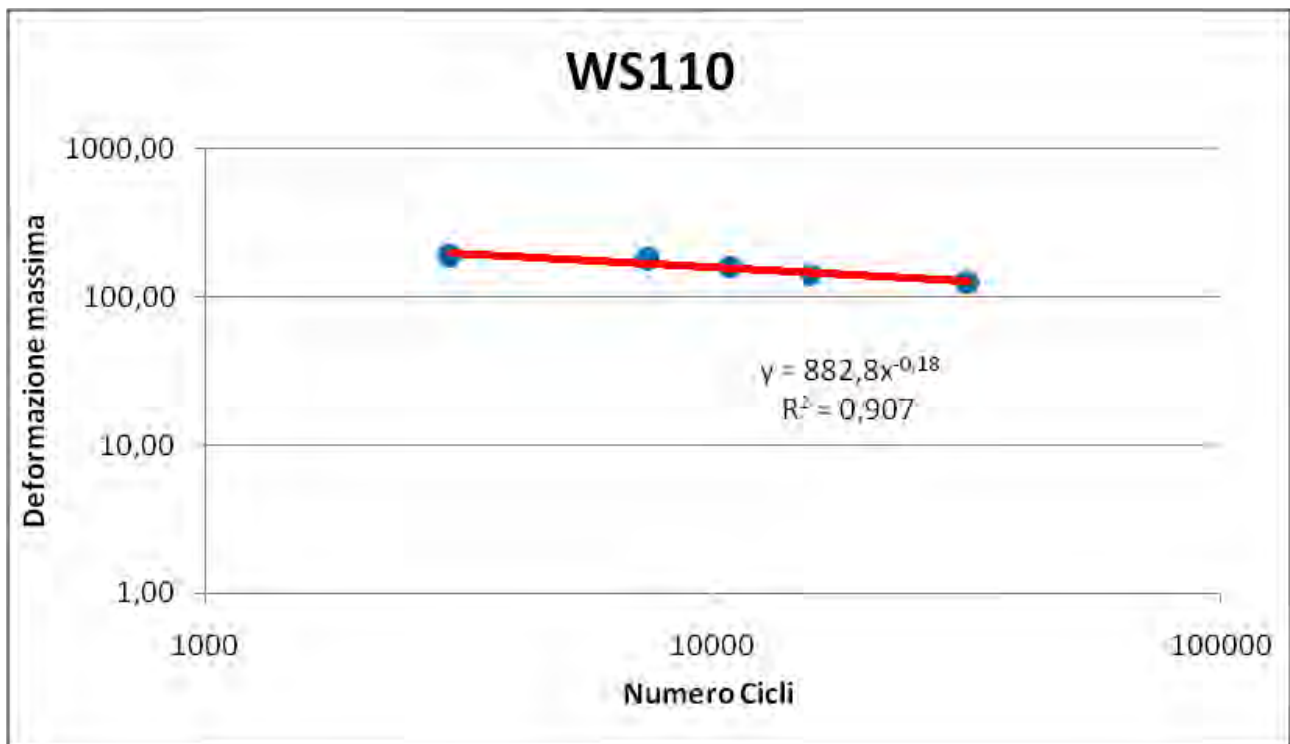


Figura 17.3 1Grafico legge di fatica WS110

17.3. CONFRONTO TRA RESISTENZE A FATICA E COMMENTI

Vengono messe a confronto le due leggi di fatica una sovrapposta all'altra.

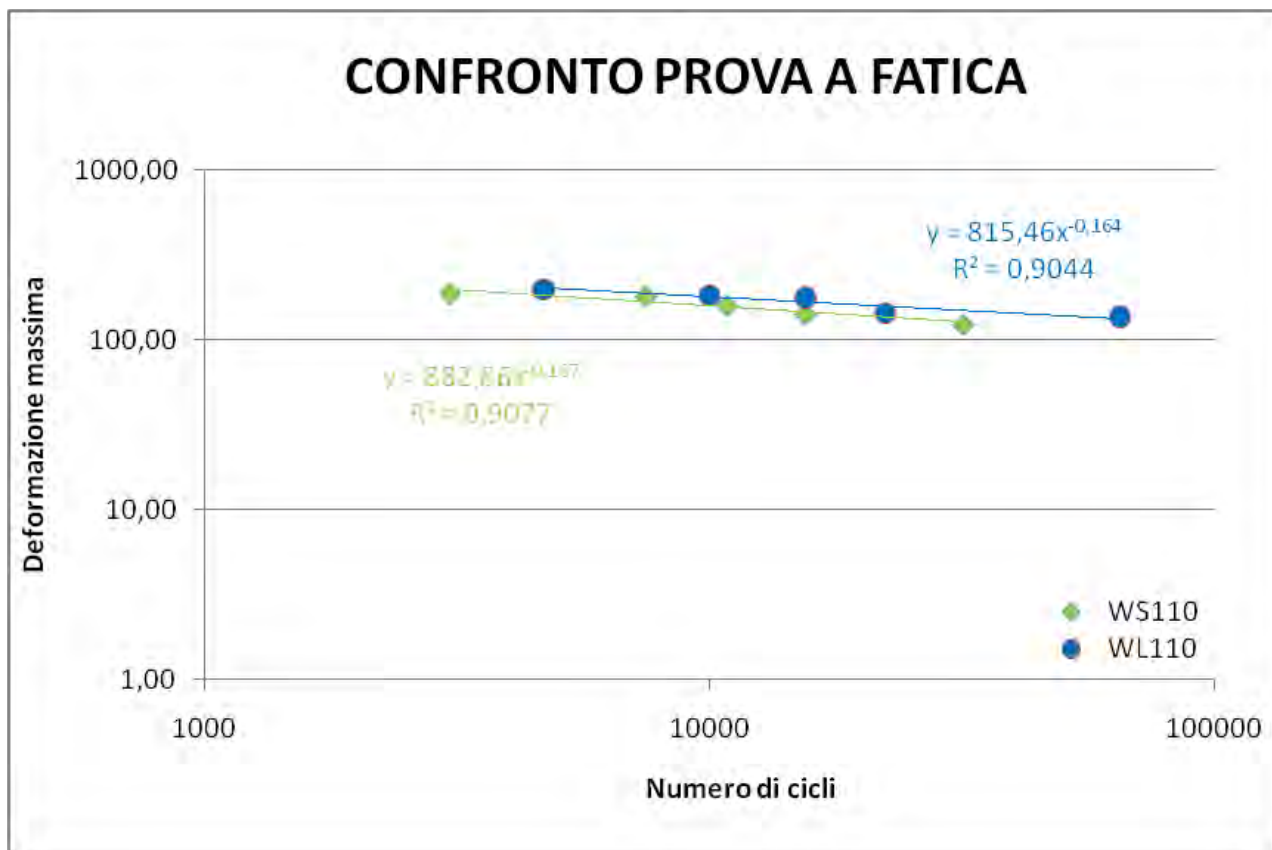


Figura 17.4 Grafico di comparazione leggi di fatica per entrambe le miscele

Quel che si denota in un primo momento è come la legge di fatica del conglomerato con calcare sia protesa a resistere a molti più cicli di carico rispetto alla miscela con scoria. Le due leggi di fatica sono pari a:

Miscela di riferimento	Legge di fatica
WL110	$Y=815,46 \cdot x^{-0,614}$
WS110	$Y=882,86 \cdot x^{-0,187}$

Tabella 17.4 Legge di fatica per entrambe le miscele

A qualsiasi deformazione applicata al provino, il conglomerato WL110 permette di resistere a un numero maggiore di cicli di carico rispetto alla miscela con scorie, prima di arrivare a rottura. Se si dovesse tracciare in Figura 17.4 Grafico di comparazione leggi di fatica per entrambe le miscele una retta orizzontale a un determinato valore di deformazione, la prima legge di fatica a essere intercettata è quella del WS110.

Questo comporta che a parità di deformazione imposta, il provino contenente le scorie andrebbe a rottura a cicli di carico inferiori rispetto alla miscela contenente solo il calcare.

In particolare, se si dovesse prendere in considerazione la deformazione $\varepsilon(10^6)$ che porta a rottura il provino a un milione di cicli di carico sostituendo quindi i cicli al posto della variabile “x” nella legge di fatica in Tabella 17.4, si otterrebbe:

Miscela di riferimento	$\varepsilon(10^6)$
WL110	84,60629
WS110	66,66407

Tabella 17.5 Deformazione a un milione di cicli

Tutto ciò è ammissibile dato che il conglomerato WS110 è caratterizzato da moduli di rigidezza maggiori rispetto al WL110, come rappresentato in Figura 15.1 Grafico confronto tra i moduli delle diverse miscele: una matrice più rigida comporta un comportamento della struttura più rigido. Ecco quindi giustificata la legge di fatica delle scorie traslata verso il basso rispetto alla miscela con calcare. Si può quindi affermare nuovamente che il conglomerato contenente scorie penalizza la miscela: ciò però non è molto preoccupante dato che la deformazione delle due miscele è dello stesso ordine di grandezza.

18. CONCLUSIONI

Una volta analizzato ogni singolo specifico comportamento meccanico delle miscele per tipologia di prova, si possono trarre le conclusioni dell'intero elaborato.

A causa delle numerose problematiche ambientali, problemi poi legati alla salute e sicurezza degli operatori, lo sviluppo della seguente tesi si è incentrato nello studio di miscele additivate in modo tale da ottenere conglomerati tiepidi a bassa temperatura di produzione. I vantaggi di quest'ultimi vengono ora omessi dato che sono stati introdotti nei primi capitoli della tesi. Il principale fattore a beneficio dell'ambiente è stato l'adozione di scorie come materiale sostitutivo del calcare. L'analisi quindi si è focalizzata sulla comparazione del comportamento meccanico di due miscele additivate con un prodotto chimico la cui differenza si trova nello schema litico: una miscela avrà come aggregato il 100% di calcare, mentre l'altra miscela sarà composta per il 40% da scorie EAF e per il 60% da calcare.

La caratterizzazione prestazionale ha riguardato quindi:

- Compattazione;
- Indice dei vuoti;
- Rigidezza;
- Deformazioni permanenti;
- Fatica.

La compatibilità ha messo in luce un fattore molto importante per la stesa in opera dei conglomerati bituminosi: la lavorabilità. Dalla compattazione delle miscele è emerso che la curva di compatibilità dei conglomerati con scorie WS è molto simile a quella delle miscele con calcare WL. La curva è quasi sovrapponibile. Quindi anche se le scorie hanno caratterizzato i provini per la loro maggiore densità, la percentuale dei vuoti raggiunta a fine compattazione è praticamente coincidente a quella raggiunta dalle miscele con calcare. Nella prima fase (fino a circa 2/3 della curva) si è notato come le miscele con scorie inducano una migliore lavorabilità quindi una minore energia di compattazione durante la stesa del conglomerato stesso.

Le miscele, una volta ultimata la fase di compattazione, si sono presentate abbastanza chiuse infatti i valori dell'indice dei vuoti ricavato per entrambi i provini è abbastanza basso. Tra l'altro l'indice non è nemmeno rientrato nei limiti imposti dal Capitolato della Società "Autostrade" a cui si è fatto riferimento per il mix design. Il motivo principale di questo risiede nel fatto che non è stato effettuato un adeguato mix design, ovvero è stato considerato a priori un quantitativo di bitume pari al 5,5% sul peso degli aggregati senza verificare quale fosse l'ottimo.

I moduli di rigidezza ricavati hanno messo in luce la natura rigida della scoria: i moduli della miscela WS sono risultati decisamente maggiori rispetto alla miscela WL e questo grazie alle elevate caratteristiche meccaniche della scoria. Oltre a questo è stato dimostrato come un indice di forma e appiattimento delle scorie più basso abbia potuto influire sulla rigidezza: le scorie prese in esame presentano una dimensione piuttosto squadrata, conferendo una migliore resistenza meccanica al conglomerato bituminoso.

Le prime problematiche si sono incontrate nello studio delle deformazioni permanenti. È stato rilevato un creep rate più elevato nel caso del conglomerato con scorie (WS) che si è tradotto in un accumulo di deformazioni più rapido rispetto alla miscela tradizionale in calcare. Le deformazioni permanenti non hanno comunque preoccupato l'utilizzo della scoria dato che il creep rate di entrambe le miscele è dello stesso ordine di grandezza.

L'ultima parte dello studio ha riguardato la fatica. Anche in questo caso il conglomerato con scorie è stato penalizzato: è emerso che a parità di deformazione applicata, i provini di conglomerato con scorie (WS) sono arrivati a rottura a un numero inferiore di cicli di carico. La differenza comunque tra le due miscele rimane irrilevante.

Concludendo si evince che l'utilizzo di scorie nei conglomerati bituminosi sembra apportare delle migliori prestazioni in termini di lavorazione, richiedendo una minore energia di compattazione. La forma della scoria e la sua tenacia induce a garantire una matrice piuttosto rigida della miscela conferendole ottime proprietà in termini di modulo di rigidezza. La scoria però va a penalizzare il conglomerato quando quest'ultimo è sottoposto a deformazioni permanenti: la miscela essendo più rigida è allo stesso tempo più fragile rispetto a quella confezionata con il 100% di calcare. Anche in termini di resistenza a fatica la scoria penalizza la miscela ma non con evidenti differenze avendo sempre deformazioni dello stesso ordine di grandezza di una pari miscela preparata con calcare.

Quindi è opportuno valutare un'analisi costi/benefici in modo tale da mettere in evidenza un'eventuale aggravio di costi di trasporto della scoria (essendo molto pesante richiederebbe un maggior dispendio di denaro per il trasporto). In questo studio infatti è stata valutata un percentuale di aggregato nel provino pari al 40%, senza utilizzare il 100% di scoria. L'utilizzo della scoria allo stesso tempo abbatte/evita i costi di estrazione di materie prime (come il calcare) dalle cave o eventuali aperture di nuovi cantieri per l'estrazione. È quindi buona cosa valutare l'utilizzo di scorie per un impiego stradale perché si avrebbero solo benefici a livello ambientale. Basti pensare che le scorie se non fossero riutilizzate vengono considerate materiale di rifiuto quindi destinato solo alla discarica.

19. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Prof. Ing. Pasetto M., Materiale didattico, Padova, 2012-2013;
2. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, “*Warm-mix asphalt: european practice*”, USA, February 2008;
3. De Franceschi D., “*Prove di ormaiamento per lo studio della deformabilità alle alte temperature dei conglomerati bituminosi*”, Tesi di Laurea – Prof Ing. Pasetto M., Padova, 2010-2011;
4. Prof. Dr. Ing. Miguel A. del Val, “*I conglomerati bituminosi a basso dispendio energetico. L’esperienza spagnola*”, Politecnico di Madrid, Brescia, 7 Settembre 2011;
5. Merusi F., “*Sessione II: i conglomerati bituminosi a basso dispendio energetico. Modifica con cere dei bitumi stradali*”, Siiv summer school 2011, Brescia, 7 settembre 2011;
6. Wisconsin Highway Reserch Program, “*Using the Gyratory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures*”, University of Wisconsin-Madison, October 2004;
7. Elsa Sanchez-Alonso, “*Evaluation of compactability and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives*”, University of Cantabria (UC), 2011;
8. Ing. Baldo N., Materiale didattico, Padova, 2012-2013;
9. Buildup, “*IL conglomerato bituminoso: alcuni chiarimenti su modulo di elasticità e “Alto modulo*”, sintesi della rivista “Rassegna del bitume” n.57/07;
10. Norme di riferimento per le prove di laboratorio CNR e UNI EN;
11. Ossich G., “*Utilizzo di Support Vector Machine per l’identificazione delle caratteristiche meccaniche delle sovrastrutture stradali a partire da misure defletto metriche*”, tesi di dottorato, Università degli studi di Trieste.
12. Tartaglia M., “*Indagine sperimentale sul comportamento reologico dei mastici bituminosi contenenti filler inorganici di origine industriale*”, tesi di laurea, Padova, 2012-2013;
13. Santella F., “*Tutti i vantaggi del tiepido*”, articolo di giornale, Novembre 2007;
14. Montanelli F., “*La posa di conglomerati bituminosi con la tecnologia degli asfalti tiepidi nel periodo invernale*”, strade e autostrade, Marzo 2009
15. Federacciai, “*La valorizzazione degli aggregati di origine siderurgica*”, articolo di giornale;
16. Il Giornale di Brescia, “*Studio di scorie di acciaieria, finalizzato al loro riciclo*”, articolo di giornale, 20 Aprile 2012;
17. Casarin Melissa, “*Analisi sperimentale di conglomerati bituminosi tiepidi prodotti con additivi chimici*”, tesi di laurea, Padova, 2014-2015.