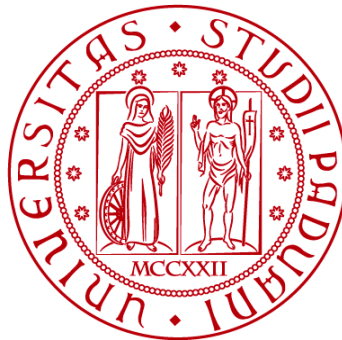


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE**  
*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



**TESI DI LAUREA**

**PROGETTAZIONE INNOVATIVA DEI  
CONGLOMERATI BITUMINOSI: IL BALANCED  
MIX DESIGN**

**Relatore: Chiar.mo PROF. ING. EMILIANO PASQUINI**  
**Correlatori: Chiar.mo ING. GIOVANNI GIACOMELLO**

**Laureando: SAMUELE TRIVELLATO**

**ANNO ACCADEMICO 2023-2024**



# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	3
<b>CAPITOLO 1 – EVOLUZIONE DELLE METODOLOGIE DI MIX DESIGN DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI</b> .....	5
1.1. DEFINIZIONE GENERALE DI MIX DESIGN .....	5
1.2. EVOLUZIONE DELLE METODOLOGIE DI MIX DESIGN DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI .....	5
1.2.1. BARBER ASPHALT PAVING COMPANY – 1890 .....	7
1.2.2. CLIFFORD RICHARDSON, NEW YORK TESTING COMPANY – 1905 .....	8
1.2.3. HUBBARD FIELD METHOD – 1920s .....	9
1.2.4. FRANCIS HVEEM – 1927 .....	11
1.2.5. BRUCE MARSHALL – 1943 .....	14
1.2.6. SUPERPAVE (METODO VOLUMETRICO) – 1993 .....	17
1.3. ATTUALITÀ NEL MIX DESIGN .....	19
<b>CAPITOLO 2 – BALANCED MIX DESIGN</b> .....	21
2.1. PERCHÈ LA NECESSITÀ DI UN NUOVO APPROCCIO AL MIX DESIGN? .....	21
2.2. DEFINIZIONE E PROCEDIMENTO BALANCED MIX DESIGN.....	21
2.3. APPROCCI BMD .....	25
2.4. GUIDA SULLA FABBRICAZIONE DEI CAMPIONI DI MISCELA BITUMINOSA PER I TEST PRESTAZIONALI BMD .....	32
2.5. PANORAMICA SULLE PRESTAZIONI DELLE MISCELE DERIVANTI DALL’USO DEL BMD .....	34
2.6. TEST PRESTAZIONALI UTILIZZABILI CON IL BMD .....	36
2.7. CONFRONTO TRA IL BMD E I METODI VOLUMETRICI TRADIZIONALI .....	39
2.8. PROCESSO DI IMPLEMENTAZIONE DEL BMD PER I GESTORI STRADALI .....	41

2.8.1. COMPITO 1: MOTIVAZIONI E BENEFICI DEL BMD .....	43
2.8.2. COMPITO 2: PIANIFICAZIONE GENERALE .....	44
2.8.3. COMPITO 3: SELEZIONE DEI TEST PRESTAZIONALI .....	44
2.8.4. COMPITO 4: APPARECCHIATURE PER IL TEST DELLE PRESTAZIONI: ACQUISIZIONE, GESTIONE DELLE RISORSE, FORMAZIONE E VALUTAZIONE .....	44
2.8.5. COMPITO 5: STABILIRE I DATI DI RIFERIMENTO .....	44
2.8.6. COMPITO 6: SPECIFICHE E SVILUPPO DEL PROGRAMMA .....	45
2.8.7. COMPITO 7: FORMAZIONE, CERTIFICAZIONI E ACCREDITAMENTI .....	45
2.8.8. COMPITO 8: IMPLEMENTAZIONE INIZIALE NELLA PRATICA INGEGNERISTICA .....	45
2.9. APPLICAZIONI ATTUALI DEL BMD .....	46
2.10. RUOLO DELLA SOSTENIBILITÀ DEL METODO BMD .....	48
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>49</b>
<b>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA .....</b>	<b>51</b>

## INTRODUZIONE

Storicamente, il processo di progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso si è principalmente concentrato sulle loro proprietà volumetriche. L'introduzione del processo di progettazione delle miscele Superpave a metà degli anni '90 ha mantenuto questa enfasi sui principi volumetrici, sia per la progettazione stessa delle miscele che per la loro accettazione durante la produzione. Una fase cruciale della metodologia iniziale di progettazione delle miscele Superpave consisteva nella valutazione delle prestazioni delle miscele di conglomerato bituminoso attraverso una serie di test, specialmente per le infrastrutture stradali con traffico moderato o elevato.

Tuttavia, a causa di diversi fattori, l'attuazione di questi test prestazionali è stata limitata nel tempo. Per molti anni, sia le agenzie di gestione delle infrastrutture che l'industria dei conglomerati bituminosi hanno manifestato l'interesse per l'adozione di test prestazionali che potessero essere integrati nel processo di progettazione. Questo interesse è stato motivato sia dalla necessità di identificare miscele che, pur soddisfacendo i requisiti volumetrici, potessero manifestare prestazioni inferiori sul campo a causa di difetti strutturali, sia dalla volontà di agevolare l'impiego responsabile di materiali innovativi nel processo di progettazione delle miscele.

Diversi dipartimenti dei trasporti negli Stati Uniti hanno cercato soluzioni per promuovere una maggiore durabilità delle miscele di conglomerato bituminoso, con l'obiettivo di rendere la rete stradale più sostenibile, resistente e conveniente. Il metodo Balanced Mix Design (BMD) si propone di affrontare queste sfide integrando criteri prestazionali nella progettazione e nell'accettazione delle miscele. A differenza degli approcci basati esclusivamente su specifiche prescrittive, il metodo BMD si avvale di test delle prestazioni sviluppati appositamente per tale metodologia al fine di valutare e accettare le miscele di conglomerato bituminoso. Il metodo BMD offre diversi livelli di implementazione che consentono una progressiva integrazione nel processo, consentendo sia alle agenzie che all'industria di acquisire familiarità con questa metodologia.



# **CAPITOLO 1**

## **EVOLUZIONE DELLE METODOLOGIE DI MIX DESIGN DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI**

### **1.1. DEFINIZIONE GENERALE DI MIX DESIGN**

Con “studio di miscela” (mix-design) si intende l’insieme di attività di ricerca e di laboratorio che permette di definire la composizione di una miscela, nel rispetto delle specifiche di capitolato e delle prestazioni richieste nel progetto esecutivo. La proporzione dei costituenti, nota come “ricetta” di una miscela (mix-proportion), è il risultato finale di una serie di attività complesse che richiedono una conoscenza approfondita delle tecnologie produttive e costruttive, delle proprietà dei materiali e delle procedure di prova per la determinazione delle grandezze.

Il Capitolato Speciale d’Appalto rappresenta l’anello di collegamento tra il progetto dell’opera e il progetto delle miscele, poichè in esso vengono identificati i materiali richiesti per la realizzazione dell’opera attraverso opportuni parametri e intervalli di accettazione che sono commisurati alle prestazioni secondo il livello di accuratezza scelto. L’abilità del progettista sta nell’adattare il Capitolato al tipo di intervento, al traffico, alle condizioni climatiche e ambientali, interpretando le esigenze del progetto stradale.

Per quanto riguarda i materiali che derivano da un processo di produzione in fabbrica come conglomerati bituminosi, calcestruzzi, misti granulari, misti cementati, o da un processo di trattamenti in sito o in impianto come la stabilizzazione delle terre, il Capitolato deve fornire la linea guida su cui si basa lo studio della miscela ottimale in termini di composizione e proprietà meccaniche, precisando la metodologia e le tecniche necessarie alla composizione del prodotto.<sup>[1]</sup>

### **1.2. EVOLUZIONE DELLE METODOLOGIE DI MIX DESIGN DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI**

L’evoluzione delle metodologie di mix design dei conglomerati bituminosi è stata un processo lungo e complesso, caratterizzato da continui sviluppi e innovazioni

nel corso del tempo. Questa storia affonda le sue radici nei primi anni del ventesimo secolo, quando il conglomerato bituminoso cominciò ad essere utilizzato su larga scala per la costruzione e la manutenzione delle strade.

Nei primi decenni, il processo di progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso si basava principalmente sull'esperienza empirica e sulla sperimentazione pratica. Gli ingegneri e i tecnici utilizzavano essenzialmente la loro conoscenza acquisita sul campo per selezionare proporzioni appropriate di materiali aggregati e di bitume, cercando di ottenere una miscela che garantisse una buona resistenza e durabilità.

Tuttavia, con l'avanzare della tecnologia e la crescente complessità delle esigenze delle infrastrutture stradali, è emersa la necessità di metodologie più sistematiche e scientifiche per progettare le miscele di conglomerato bituminoso. Questo ha portato alla nascita di diverse metodologie di mix design nel corso del tempo.

Una delle prime metodologie strutturate è stato il metodo Hveem, sviluppato negli anni '30 da Francis Hveem, che si concentrava sull'analisi della stabilità e della resistenza alla deformazione delle miscele di conglomerato bituminoso. Questo metodo ha introdotto nuovi criteri di valutazione delle prestazioni delle miscele, contribuendo a migliorare la qualità e la durabilità delle infrastrutture stradali.

Successivamente è emerso il metodo Marshall, sviluppato negli anni successivi da Bruce Marshall. Questo approccio prevedeva la determinazione delle proporzioni ottimali di aggregati e bitume attraverso una serie di test di laboratorio, al fine di ottenere una miscela che presentasse le migliori caratteristiche di resistenza e durabilità.

Negli anni successivi, con l'avvento delle tecnologie informatiche e dei modelli di simulazione avanzati, sono state sviluppate metodologie più sofisticate e basate sulla performance, come il metodo Superpave. Introdotta negli anni '90, questa metodologia ha rivoluzionato il processo di progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso, integrando criteri di prestazione basati sul traffico e sul clima per garantire la massima durabilità e resistenza delle miscele.

Oggi, le metodologie di mix design dei conglomerati bituminosi continuano ad evolversi, con un crescente focus sull'uso di tecnologie avanzate come la modellazione computazionale e l'intelligenza artificiale per ottimizzare le



prestazioni delle miscele e garantire la sostenibilità delle infrastrutture stradali nel lungo termine.

Qui di seguito esamineremo attentamente i passaggi più significativi con una linea temporale delle metodologie di mix design.

### **1.2.1. BARBER ASPHALT PAVING COMPANY – 1890**

Nel 1890, in un periodo caratterizzato dall'apice dell'era industriale, l'imprenditore Amzi L. Barber diede avvio ad un'importante svolta nel settore delle infrastrutture stradali con la creazione della Barber Asphalt Paving Company. La sua visione e determinazione influenzarono notevolmente i metodi di costruzione e manutenzione delle strade.

Barber, nato nel 1843, inizialmente intraprese una carriera nell'ambito dell'istruzione prima di dedicarsi al settore immobiliare. Durante questa fase della sua professione, identificò la crescente richiesta di strade asfaltate a costi accessibili. Riconoscendo il conglomerato bituminoso come una risorsa versatile e conveniente per la costruzione stradale, Barber fondò la Barber Asphalt Company nel 1883. Sperimentò varie formule di miscelazione al fine di trovare la combinazione ottimale di materiali che garantisse resistenza ed economicità. La sua “ricetta” innovativa prevedeva una miscela di legante bituminoso (12-15%), sabbia (70-83%) e filler carbonatico (5-15%), accuratamente bilanciata nelle proporzioni prescritte. Questa miscela si dimostrò un successo senza precedenti, offrendo strade durevoli e affidabili ad un costo significativamente inferiore rispetto ai metodi tradizionali di costruzione stradale. Attraverso la sua impresa pionieristica, Barber non solo contribuì a migliorare il paesaggio urbano con strade più sicure e funzionali, ma creò anche nuove opportunità economiche e commerciali per comunità in rapida espansione. Il suo lavoro segnò l'inizio di un'era di innovazione nel settore delle infrastrutture stradali, aprendo la strada ad ulteriori sviluppi e progressi nel campo delle pavimentazioni stradali.<sup>[2]</sup>

### **1.2.2. CLIFFORD RICHARDSON, NEW YORK TESTING COMPANY – 1905**

Nel 1905, Clifford Richardson, laureato in chimica nel 1877 presso l'Università di Harvard, emerse come figura di spicco nel campo delle pavimentazioni di conglomerato bituminoso, portando con sé una profonda conoscenza della chimica applicata a questo settore.

Dopo aver trascorso gli anni precedenti a lavorare nella Barber Asphalt Company, Richardson trasferì le sue competenze a New York nel 1896, dove fondò il New York Testing Laboratory nel 1900. La sua esperienza e il suo impegno nel migliorare le metodologie di mix design lo resero una figura di rilievo nel settore.

La miscela da lui ideata introduceva criteri più specifici nella selezione delle materie prime, ponendo particolare attenzione alla dimensione degli aggregati e alla loro combinazione per ottenere miscele più durevoli. Questa formulazione prevedeva l'utilizzo di un mix di sabbia, con il 100% di essa passante attraverso il vaglio n.10 (corrispondente al setaccio con maglia di apertura 2 mm) e il 15% passante il vaglio n.200 (corrispondente al setaccio con apertura della maglia di 0,075 mm), combinato con una percentuale di bitume compresa tra il 9 e il 14% e altri aggregati più grossi che funzionavano da struttura portante della miscela. Questa precisione nella selezione degli ingredienti contribuì a migliorare la qualità e le prestazioni delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso, stabilendo nuovi standard nel settore.<sup>[3]</sup>

Per la creazione delle miscele, il metodo Richardson prevedeva i seguenti passaggi fondamentali:

1. analisi granulometrica degli aggregati: fase in cui si separano gli aggregati nelle diverse dimensioni mediante setacciatura e si determina la distribuzione granulometrica;
2. selezione degli aggregati: si selezionano gli aggregati con varie dimensioni in modo da ottenere una curva granulometrica che si avvicini il più possibile ad una curva teorica ottimale, continua e ben distribuita, evitando lacune granulometriche;
3. determinazione della curva teorica: la curva teorica proposta da Richardson si basa sul principio di massima densità e deve rappresentare la

percentuale cumulativa passante attraverso ciascun setaccio in funzione del diametro del setaccio stesso;

4. combinazione degli aggregati: si vanno quindi a combinare le diverse dimensioni degli aggregati per ottenere una miscela la cui curva granulometrica si avvicini a quella teorica (Richardson proponeva una serie di combinazioni sperimentali e verifiche per trovare la combinazione ottimale);
5. proporzione di bitume: una volta ottenuta la curva granulometrica ottimale, si determina la percentuale di bitume necessaria per legare gli aggregati in modo efficace eseguendo test sperimentali al fine di ottenere la miscela avente le migliori proprietà meccaniche e di durabilità.<sup>[4]</sup>

In sintesi, il metodo di Clifford Richardson si concentrava sulla selezione e combinazione degli aggregati in base alla loro granulometria per ottenere una miscela densa e ben compatta. Rimane comunque un metodo storico superato dai metodi più moderni, i cui principi fondamentali restano ancora rilevanti e influenzino tuttora le pratiche di progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso.

### **1.2.3. HUBBARD FIELD METHOD – 1920s**

Durante gli anni '20, emerse il cosiddetto "Hubbard Field Method" nel campo del mix design per le pavimentazioni stradali. Purtroppo, le informazioni riguardanti questo metodo sono limitate e poco documentate, così come le biografie dei suoi presunti creatori, Charles Hubbard e Frederick Field. Tuttavia, è noto che queste figure abbiano condotto ricerche approfondite nello studio delle miscele di conglomerato bituminoso, attribuendo particolare importanza alla stabilità delle pavimentazioni. Infatti il metodo doveva essere all'incirca il seguente:

1. preparazione dei campioni: venivano preparati svariati campioni cilindrici con diverso contenuto di legante; i campioni avevano diametro di dimensioni 2 pollici ( $\approx 50,8$  mm), e venivano riscaldati a temperatura di compattazione in un bagno d'acqua;
2. compattazione dei campioni: ogni campione riscaldato veniva posizionato nell'apposito stampo di prova e immerso nuovamente in acqua calda con

successiva applicazione di un carico a velocità di 2,4 pollici/minuto per essere compattato;

3. esecuzione test di stabilità Hubbard-Field (Figura 1): per ricavare i dati sulla stabilità dei campioni, ognuno di essi veniva fatto passare attraverso un'apertura di 1,75 pollici ( $\approx 4,445$  cm), più piccola della dimensione del provino, provocando una deformazione dello stesso (nella figura, il carico, indicato come load, schiacciava un pistone, indicato come plunger, che distribuiva la forza sul provino, situato sotto al pistone, il provino andava a deformarsi perchè pressato sull'apertura sottostante, indicata come testing ring). Si registrava quindi il carico massimo necessario per compiere tale azione, misurato in libbre;

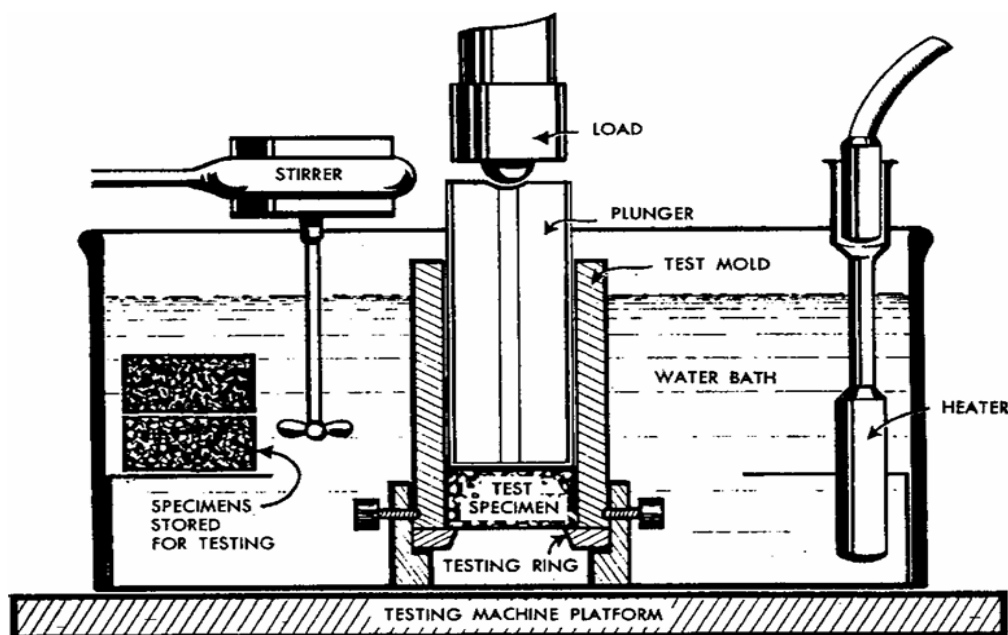


Figura 1 – Apparecchiatura di prova per la stabilità secondo Hubbard-Field.

4. calcolo della stabilità media: dopo aver testato tutti i campioni, veniva calcolata la stabilità media per ciascuno di essi;
5. determinazione del contenuto ottimale di bitume: veniva tracciato un grafico della stabilità media ottenuta rispetto al contenuto di bitume per determinare quale fosse il contenuto di legante ottimale. <sup>[5]</sup>

Lo "Hubbard Field Method" rappresentò un passo significativo nell'evoluzione del mix design, poiché introduceva nuove considerazioni per migliorare la resistenza

e la durabilità delle pavimentazioni stradali. È possibile che il contributo di Hubbard e Field abbia influenzato lo sviluppo successivo delle metodologie di mix design, anche se la documentazione e le testimonianze dirette sono scarse. Tuttavia, il loro impegno nel migliorare la qualità delle pavimentazioni stradali rimane un capitolo importante nella storia dell'ingegneria delle infrastrutture.

#### **1.2.4. FRANCIS HVEEM – 1927**

Francis N. Hveem, figura chiave nel campo dell'ingegneria delle pavimentazioni, rivoluzionò il settore con il suo contributo innovativo alla progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso. Alla fine degli anni '20, la California Division of Highways adottò una miscela di aggregati e bitume conosciuta come "oil mix" su molte delle loro strade rurali. Questa miscela, un compromesso tra l'Hot Mix Asphalt (HMA) ad alte prestazioni e un metodo penetrativo più economico, non aveva però un metodo di progettazione definito. Basandosi sulla sua ricerca e quella di altri, Hveem sviluppò un metodo per determinare la quantità corretta di bitume in base alla superficie dell'aggregato, tenendo conto della sua granulometria. Rilevò che anche con il giusto contenuto di bitume, le strade con aggregati dalla "struttura superficiale dura e vetrosa" tendevano a deformarsi eccessivamente sotto carico, mentre quelle con "struttura superficiale ruvida e irregolare" erano più stabili. La filosofia alla base del metodo Hveem si basava sull'ottenere uno spessore ottimale del film di bitume che riveste ciascuna particella di aggregato, garantendo una stabilità sufficiente per resistere al carico del traffico e migliorare la durabilità complessiva del conglomerato bituminoso. Hveem sviluppò lo stabilometro Hveem, un dispositivo per misurare la stabilità della miscela, e affrontò le discrepanze tra le misurazioni in laboratorio e sul campo con l'introduzione del California Kneading Compactor, una macchina per la compattazione in grado di simulare l'azione dei rulli sul campo.<sup>[6]</sup>

Per quanto riguarda la procedura di miscelazione, possiamo citare i seguenti passaggi:

1. selezione degli aggregati: sebbene Hveem non sviluppò specifiche per la selezione degli aggregati, questa fase rimane la base di ogni metodo di mix

design. Una tipica valutazione nella selezione degli aggregati (valida sia per Hveem che per il successivo metodo Marshall) consiste nel <sup>[7]</sup>:

- i. determinare le proprietà fisiche degli aggregati: eseguendo vari test, si determinano resistenza e abrasione, durabilità e solidità, pulizia (cleanliness, intesa come purezza del materiale) e materiali dannosi (materiali indesiderati o dannosi presenti nel materiale principale che possono compromettere le altre proprietà) e infine forma delle particelle e struttura della superficie;
  - ii. determinare altre proprietà fisiche descrittive dell'aggregato: se l'aggregato è accettabile rispetto al punto (i) vengono eseguiti ulteriori test per caratterizzare granulometria e dimensione, e peso specifico e assorbimento (ovvero capacità dell'aggregato di assorbire acqua);
  - iii. eseguire i calcoli per combinare diversi aggregati al fine di ottenere la distribuzione granulometrica desiderata per la miscela: in genere si eseguono diversi tentativi di miscelazione e calcoli per trovare la combinazione ottimale che soddisfi i requisiti di granulometria.
2. selezione del legante bituminoso: anche in questo caso, Hveem non sviluppò una procedura specifica per la selezione del legante bituminoso. Diverse agenzie utilizzano metodi propri, basati su esperienza locale, prestazioni passate o procedure standardizzate. Dopo la selezione del legante, vengono condotti test preliminari per comprendere la relazione tra temperatura e viscosità dello stesso, essenziale per garantire la corretta prestazione della miscela bituminosa;
3. determinazione del contenuto ottimale di bitume: per il metodo Hveem, si può riassumere in cinque punti:
- i. preparazione dei campioni: vengono create diverse miscele di prova costituite da aggregati e bitume, ciascuna con un diverso contenuto di legante (ad esempio 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, e 7 per cento per un totale di sei provini);

ii. compattazione delle miscele di prova nel California Kneading Compactor (Figura 2): questo compattatore è specifico per il metodo Hveem e serve a compattare le miscele di conglomerato bituminoso, applicando una serie di pressioni e movimenti di impastamento per simulare il traffico veicolare e ottenere una compattazione realistica;

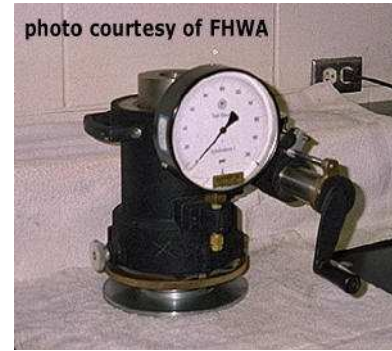


Figura 2 – California Kneading Compactor.

iii. testare i campioni per stabilità e coesione utilizzando lo stabilometro e il coesimetro di Hveem: anch'essi sono strumenti specifici per il metodo Hveem:

- stabilometro Hveem (Figura 3): è uno strumento fondamentale nel metodo Hveem per valutare le prestazioni delle miscele di conglomerato bituminoso, determinando quanto il campione resiste alla deformazione agente da un carico verticale, misurando la pressione che si sviluppa lateralmente nel campione durante il test<sup>[8]</sup>;



Figura 3 – Stabilometro Hveem.

- coesimetro Hveem (Figura 4): utilizzato per misurare la coesione del campione determinando la forza necessaria per romperlo o piegarlo come se fosse un fascio a sbalzo<sup>[8]</sup>;



Figura 4 – Coesimetro Hveem.

- iv. determinare la densità e altre proprietà volumetriche dei campioni: due misure di densità, la gravità specifica di massa e la gravità specifica massima teorica, vengono utilizzate per calcolare i parametri volumetrici, che includono i vuoti d'aria, i vuoti nell'aggregato minerale e i vuoti riempiti con bitume. Questi parametri devono rispettare i criteri stabiliti dalle normative locali o statali;
- v. selezionare il contenuto ottimale di bitume: combinando i risultati dei diversi test (stabilometro, densità e vuoti) si può selezionare il contenuto ottimale di legante bituminoso. Vengono tracciati graficamente i risultati in base al contenuto di legante presente per verificare la presenza di eventuali errori nei test. Le caratteristiche tipiche di questi grafici includono che, con l'aumento del contenuto di bitume, la stabilità Hveem diminuisce, la densità generalmente aumenta e i vuoti d'aria diminuiscono. Generalmente il contenuto ottimale di bitume corrisponde al 4% di vuoti d'aria nella miscela, a condizione che questo contenuto soddisfi i requisiti di stabilità e coesione. L'obiettivo del metodo Hveem è quindi trovare un equilibrio tra durabilità e stabilità, scegliendo un contenuto di legante bituminoso che garantisca la massima durabilità possibile senza compromettere la stabilità della miscela.<sup>[9]</sup>

### **1.2.5. BRUCE MARSHALL – 1943**

Durante la seconda guerra mondiale, il crescente peso e la pressione delle ruote degli aerei militari in rapida evoluzione esercitavano una crescente tensione sulle pavimentazioni degli aeroporti. L'Esercito degli Stati Uniti esplorò varie metodologie di progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso. Tra queste, il metodo di stabilità Marshall emerse come il più promettente.

Originariamente concepito intorno al 1939 e successivamente perfezionato dall'esercito stesso, nel 1943, Bruce Marshall, un ingegnere del Mississippi Highway Department, delineò i fondamenti del metodo di progettazione del mix che oggi porta il suo nome. Il metodo mirava a selezionare con precisione il contenuto di bitume per ottenere una densità ottimale che garantisse stabilità e una gamma appropriata di valori di scorrimento <sup>[10]</sup>.



L'Esercito degli Stati Uniti adottò tale test di stabilità integrandolo con una misurazione della deformazione attraverso un flussometro. Questo approccio innovativo si dimostrò estremamente efficace in quanto permetteva di stressare l'intero campione di conglomerato bituminoso, garantendo test rapidi e accurati con un minimo sforzo. Inoltre, la portabilità e la compattezza del dispositivo lo resero strumento pratico e versatile sul campo.

Come il precedente metodo, la procedura di progettazione della miscela secondo il metodo Marshall si compone dei seguenti passaggi, alcuni dei quali simili (se non identici) al metodo Hveem:

1. selezione degli aggregati: stesso procedimento del punto 1. del metodo Hveem;
2. selezione del legante bituminoso: stesso procedimento del punto 2. del precedente metodo;
3. determinazione del contenuto ottimale di bitume: anche per il metodo Marshall, il procedimento si può riassumere in cinque punti:
  - i. preparazione del campione: come altri metodi di progettazione delle miscele, il metodo Marshall utilizza diverse miscele di prova composte da aggregati e bitume variando il contenuto di legante (in genere 5 diverse miscele con 2 o 3 provini ciascuna di percentuali ad esempio 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 e 6.5, per un totale di 10/15 campioni). Per garantire che il contenuto ottimale venga identificato, le miscele di prova devono coprire una gamma di contenuti di bitume sia maggiori che minori del contenuto stimato. Questo processo inizia quindi con una stima del contenuto ottimale, dalla quale vengono determinati i contenuti di legante per le miscele di prova;

ii. compattazione delle miscele di prova utilizzando il compattatore Marshall (Figura 5): questo strumento è specifico per il metodo Marshall per compattare le miscele. I campioni vengono riscaldati alla temperatura di compattazione prevista e poi compattati con questo strumento, che applica una pressione specifica attraverso un piede tampone circolare. La compattazione viene eseguita con un numero specifico di colpi, variabile a seconda del carico di traffico previsto<sup>[11]</sup>;



Figura 5 – Marshall drop hammer.

iii. testare i campioni nella macchina di prova Marshall (Figura 6) per determinare stabilità e scorrimento: anche questo strumento è specifico per il metodo di progettazione Marshall. La stabilità del

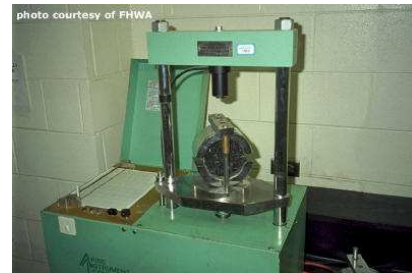


Figura 6 – Apparecchiatura di prova per la stabilità secondo Marshall

campione viene misurata determinando il carico massimo che lo stesso può sopportare prima di iniziare a deformarsi. Durante il processo, viene anche misurato lo scorrimento plastico del provino, ovvero la deformazione che subisce sotto il carico applicato. Questi dati vengono registrati e utilizzati per valutare la qualità e le prestazioni previste della miscela di conglomerato bituminoso<sup>[11]</sup>;

iv. determinare la densità e altre proprietà volumetriche dei campioni: stesse considerazioni del punto (3.iv.) del metodo Hveem;

v. selezione del contenuto ottimale di legante bituminoso<sup>[7]</sup>: viene scelto in base alla combinazione dei risultati dei test di stabilità e scorrimento Marshall, della densità e dei vuoti. Il processo include la creazione di diversi grafici che mostrano come varia il contenuto di legante bituminoso rispetto a vari parametri (densità, stabilità,

scorrimento, vuoti d'aria, VMA, VFA). Dopo aver determinato il contenuto di legante bituminoso che corrisponde al contenuto mediano di vuoti d'aria (tipicamente 4%), si confrontano i valori ottenuti con quelli previsti per verificare che rientrino nelle specifiche. Se tutto è conforme, il contenuto ottimale è confermato; altrimenti, la miscela deve essere riprogettata.

Nel corso degli anni '50, il metodo Marshall continuò ad essere perfezionato attraverso una serie di test su materiali, carichi di traffico e variabili meteorologiche. Oggi, il metodo Marshall rappresenta uno dei principali approcci nel campo del mix design, utilizzato ampiamente in tutto il mondo per garantire la qualità e la durabilità delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso.<sup>[12]</sup>

#### **1.2.6. SUPERPAVE (METODO VOLUMETRICO) – 1993**

Il 1993 segna un importante punto di svolta nel settore delle infrastrutture stradali degli Stati Uniti con l'introduzione del metodo Superpave (SUPERior PERforming Asphalt PAVements)<sup>[7]</sup>. Questo metodo, sviluppato come parte dello Strategic Highway Research Program (SHRP), rappresenta un innovativo approccio alla progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso, mirato a migliorare le prestazioni, la durata e la sicurezza delle pavimentazioni autostradali. Il SHRP, istituito nel 1987 con un finanziamento di 150 milioni di dollari, ha svolto un ruolo cruciale nella ricerca applicata per l'avanzamento del sistema stradale statunitense<sup>[13]</sup>. Concentrandosi su quattro aree chiave - conglomerato bituminoso, calcestruzzo e strutture, operazioni stradali e prestazioni della pavimentazione - il programma ha prodotto oltre 100 nuovi dispositivi, test e specifiche.

Il metodo Superpave, sviluppato per sostituire i precedenti metodi Hveem e Marshall, integra la selezione del bitume e degli aggregati nel processo di progettazione della miscela, considerando anche fattori come il traffico e il clima. Utilizzando dispositivi di compattazione innovativi come la pressa a taglio girevole (Gyratory compactor), Superpave si basa su un sistema di progettazione e analisi che combina test di analisi e modelli di previsione delle prestazioni. La metodologia Superpave prevedeva tre livelli di progettazione della miscela in base al traffico di progetto, ma i test prestazionali non furono implementati su larga

scala a causa delle loro limitazioni pratiche. Tuttavia, Superpave ha contribuito significativamente al miglioramento della resistenza all'ormaiamento e alla durabilità delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso.

Il metodo di progettazione secondo Superpave si compone di tre passaggi base:

1. selezione degli aggregati: la selezione degli aggregati avviene attraverso specifiche di granulometria, requisiti sulle proprietà fisiche degli aggregati (come angolarità, particelle piatte e allungate e contenuto di argilla) e criteri basati sulle proprietà della fonte degli aggregati (come durabilità e solidità). Questi criteri<sup>[14]</sup> assicurano che gli aggregati utilizzati siano adatti per produrre una miscela di conglomerato bituminoso di alta qualità e prestazioni;
2. selezione del legante bituminoso: nel metodo Superpave si usano dei leganti bituminosi chiamati Superpave PG (Performance Grade) la cui scelta varia in base agli estremi di temperatura previsti per la pavimentazione nella località in cui verranno utilizzati. Questi estremi possono essere calcolati con software (ad esempio LTPPBind) oppure si può utilizzare un Superpave PG standard, ovvero PG 64-16, il cui utilizzo è comune a livello statale (è un tipo di bitume specifico adatto a temperature massime di 64° e minime di -16°, garantendo che il materiale possa resistere alle condizioni climatiche estreme previste);
3. determinazione del contenuto ottimale di bitume: nel metodo Superpave, questo passaggio si sviluppa in 4 fasi:
  - i. preparazione dei campioni iniziali: si creano campioni con diversi contenuti di legante bituminoso (in genere due campioni con percentuali di bitume proposto dal progetto, due con una percentuale di legante inferiore dello 0,5% rispetto alla prima, e due con contenuto di legante superiore dello 0,5% rispetto sempre a quella di progetto);

ii. compattazione delle miscele di prova con il Superpave Gyratory Compactor (Figura 7): questo dispositivo è uno strumento specifico e fondamentale del metodo Superpave, in grado di fornire una compattazione standardizzata e dati dettagliati necessari per progettare miscele di conglomerato bituminoso che possano resistere alle condizioni di traffico e climatiche reali;<sup>[15]</sup>



Figura 7 – Gyratory Compactor

- iii. determinare la densità e altre proprietà volumetriche dei campioni: stesse considerazioni del punto 3.iv. del metodo Hveem;
- iv. selezione del contenuto ottimale di legante bituminoso: si sceglie il contenuto di legante bituminoso che corrisponde al 4% di vuoti d'aria nella miscela, punto che rappresenta la quantità che garantisce equilibrio ottimale tra durabilità, compattezza e resistenza della miscela.<sup>[16]</sup>

Nel processo di progettazione delle miscele secondo il metodo Superpave, non esistono test standard di performance accettati, quindi non viene utilizzato nulla di analogo ai test di stabilità e coesione Hveem per esempio. L'unico test che viene utilizzato in questo metodo è quello per rilevare la suscettibilità all'acqua (nello specifico il test modificato di Lottman<sup>[17]</sup>). Sono comunque previste ricerche per creare test standardizzati di performance da incorporare in questo metodo.

### 1.3. ATTUALITÀ NEL MIX DESIGN

Negli ultimi anni, nonostante i successi iniziali del metodo volumetrico, sono emersi nuovi problemi legati alla fessurazione e alla disintegrazione delle pavimentazioni. Questo ha portato molte organizzazioni nel settore delle infrastrutture stradali a cercare nuovi approcci alla progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso, come evidenziato dalla formazione della task force

BMD (Balanced Mix Design) nel settembre 2015, sotto la Federal Highway Administration (FHWA). Tale metodo verrà analizzato nel capitolo seguente.

## **CAPITOLO 2**

### **BALANCED MIX DESIGN**

#### **2.1. PERCHÈ LA NECESSITÀ DI UN NUOVO APPROCCIO AL MIX DESIGN?**

L'emergere di problematiche e la continua ricerca di innovazione rappresentano le principali motivazioni per sviluppare soluzioni nuove e innovative.

Il sistema di progettazione delle miscele Superpave originariamente prevedeva tre livelli per diversi gradi di traffico, ma i test prestazionali proposti non sono mai stati implementati su larga scala a causa della loro complessità. Inizialmente, il focus principale era sulla resistenza all'ormaiamento, che è stata migliorata, ma col tempo è emerso un nuovo problema: la fessurazione delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso. I tentativi delle agenzie stradali di migliorare la durabilità e la resistenza alla fessurazione delle miscele modificando i requisiti di progettazione non hanno avuto un successo uniforme. I parametri volumetrici del metodo Superpave, come i vuoti d'aria progettati ( $V_a$ ) e il volume di legante effettivo ( $V_{be}$ ), hanno mostrato limitazioni nel prevedere le prestazioni delle miscele, specialmente con l'uso di materiali riciclati e additivi. Le preoccupazioni riguardo alla durabilità e alla qualità delle pavimentazioni hanno spinto l'industria ad esplorare il Balanced Mix Design (BMD), che offre un approccio più equilibrato e robusto per la progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso, migliorando sia la resistenza all'ormaiamento che alla fessurazione.<sup>[18]</sup>

#### **2.2. DEFINIZIONE E PROCEDIMENTO BALANCED MIX DESIGN**

Il Balanced Mix Design (BMD) rappresenta un'evoluzione significativa nel campo della progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso, poiché si basa su test prestazionali accurati e approfonditi. Viene definito come “un metodo di progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso che utilizza test prestazionali su provini opportunamente condizionati che affrontano molteplici modalità di degrado tenendo in considerazione l'invecchiamento della miscela, il traffico, il clima e la posizione all'interno della struttura della

pavimentazione»<sup>[19,20,21]</sup>. In pratica, il BMD integra due o più prove sulle prestazioni al fine di valutare la capacità della miscela di conglomerato bituminoso di resistere a vari tipi di stress. Numerosi test sono stati sviluppati da ricercatori per valutare specifiche proprietà delle miscele di conglomerato bituminoso, tra cui la resistenza all'ormaiamento, la fessurazione e la suscettibilità all'acqua.

La procedura generale di progettazione della miscela di conglomerato bituminoso seguendo il metodo BMD si compone dei seguenti passaggi:

1. selezione dei materiali: un passo importante del metodo Superpave si basa sulla selezione degli aggregati e del legante bituminoso. Tale prassi viene mantenuta anche nel metodo BMD e si scelgono appunto:
  - gli aggregati (tra cui pietrisco, sabbia e filler), con caratteristiche adeguate, la cui scelta può seguire le regole tradizionali di selezione degli aggregati (come già visto in altri metodi). Per incrementare la sostenibilità di tale metodologia, si cerca di utilizzare materiali possibilmente riciclati (ad esempio il RAP, Reclaimed Asphalt Pavement, ovvero un materiale recuperato dalle pavimentazioni esistenti che vengono demolite, riutilizzabile per la creazione di nuove miscele, favorendo la sostenibilità ambientale) previa constatazione della loro conformità nell'utilizzo nel progetto;
  - il legante bituminoso, in base alle condizioni climatiche e alle esigenze prestazionali;
  - gli additivi (il cui utilizzo è opzionale), che possono essere polimeri, fibre, agenti antistripping (per sopperire i problemi derivanti dall'acqua), e altri;
2. definizione delle specifiche prestazionali: dopo uno studio preliminare del territorio in cui si andrà ad operare, compreso studio del traffico previsto e del clima (caldo, freddo, ecc.), bisogna stabilire i requisiti prestazionali per la miscela, includendo:
  - resistenza alla deformazione permanente, ovvero la capacità di resistere ai carichi ripetuti senza deformarsi eccessivamente;



- resistenza alla fatica, ovvero la capacità di resistere a cicli ripetuti di carico senza fessurarsi;
  - durabilità, ovvero la capacità di resistere agli agenti atmosferici e chimici (ad esempio resistenza all'acqua e alla fessurazione dovuta ai cambi di temperatura);
3. progettazione della miscela: fase fondamentale di ogni metodologia di progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso composta da:
- determinazione delle proporzioni, ovvero si calcolano le proporzioni dei diversi componenti (aggregati, bitume, additivi) per ottenere una miscela ottimale;
  - preparazione dei campioni, ovvero miscelare i materiali in laboratorio per creare campioni di prova che verranno utilizzati successivamente per testarne le varie tipologie di resistenze;
4. valutazione delle prestazioni meccaniche, fase in cui si eseguono test prestazionali (analizzati maggiormente in seguito) sui provini di prova precedentemente preparati per valutare in particolare:
- resistenza alla deformazione permanente, utilizzando test come ad esempio il Wheel Tracking Test (WTT) per misurare la resistenza all'ormaiamento;
  - resistenza a fatica, eseguendo test come ad esempio prove flessionali su provini prismatici per valutare la capacità di resistere a cicli di carico ripetuti;

Si può pensare di eseguire altri test per verificare altri parametri la cui rilevanza è minore di quelli menzionati sopra;

5. valutazione delle prestazioni di durabilità, testando i campioni precedentemente preparati per valutare:
- resistenza all'acqua, utilizzando ad esempio il Tensile Strength Ratio (TSR) per valutare la suscettibilità all'acqua;
  - resistenza alla fessurazione termica, eseguendo ad esempio il Thermal Stress Restraint Specimen Test (TSRST) per misurare la resistenza alle fratture causate da variazioni termiche;

6. bilanciamento delle prestazioni: vengono utilizzati i risultati delle prove precedenti per bilanciare la miscela, seguendo così un principio di ottimizzazione, cioè andando a modificare le proporzioni dei materiali o introducendo additivi per migliorare le prestazioni meccaniche e di durabilità, cercando un equilibrio tra resistenza alla deformazione, resistenza alla fatica, durabilità e stabilità;
7. validazione della miscela: una volta trovata la composizione ottimale della miscela si può eseguire:
  - produzione di prova: si produce una quantità limitata di miscela con le proporzioni ottimali e ne si verificano le prestazioni sul campo;
  - monitoraggio e aggiustamenti: si monitorano le prestazioni della pavimentazione reale e si apportano eventuali aggiustamenti alla miscela se necessario;
8. documentazione e approvazione: essendo un metodo non ancora particolarmente utilizzato, si riportano dei documenti utili utilizzabili da chiunque voglia implementare questo metodo nel proprio territorio e abbia necessità di linee guida da seguire sulla base di esperienze di coloro che hanno già utilizzato tale metodologia di progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso. In particolare si scrive un relazione finale, ovvero un documento dettagliato, dove si riportano le prove eseguite, i risultati ottenuti e le eventuali modifiche apportate.

Infine si eseguono una serie di passaggi e verifiche finali necessari per garantire che la miscela progettata sia conforme alle specifiche tecniche e prestazionali richieste. Questo passo (detto approvazione) è cruciale per assicurare che la miscela possa essere utilizzata in applicazioni reali rispettando gli standard di sicurezza, di durabilità e di qualità.

Il metodo BMD è un processo iterativo che richiede una continua valutazione e ottimizzazione delle prestazioni della miscela. La collaborazione tra laboratori, produttori di materiali e ingegneri è essenziale per garantire che la miscela soddisfi tutte le specifiche prestazionali richieste.

### 2.3. APPROCCI BMD

La progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso con l'utilizzo del BMD può essere svolta seguendo quattro approcci. La scelta di uno rispetto ad un altro è soggettiva della road authority in funzione del grado di rischio che si vuole intraprendere in quanto non tutti i metodi sono conosciuti e utilizzati allo stesso modo. Comunque, man mano che si acquisisce maggiore esperienza e fiducia con un approccio, un'agenzia può evolversi verso un metodo differente, più efficace e innovativo.

Questi procedimenti sono classificati dalla lettera A alla D <sup>[19]</sup> e sono:

- *approccio A – Progettazione volumetrica con verifica delle prestazioni:*

questo approccio inizia con l'applicazione di un qualsiasi metodo volumetrico di progettazione della miscela attualmente in uso (come Superpave, Marshall o Hveem) per determinare un contenuto ottimale di legante (optimum binder content OBC). Successivamente, la miscela OBC ottenuta viene testata utilizzando specifici test prestazionali selezionati appositamente per valutarne la resistenza all'ormaiamento, alle fessurazioni, ai danni causati dall'acqua e altri fattori correlati. Se la miscela soddisfa tutti i requisiti dei vari test, viene definita la ricetta della miscela (job mix formula JMF) e si procede alla produzione. In caso contrario, si ripete l'intero processo di progettazione della miscela utilizzando materiali diversi o variando le proporzioni delle componenti della stessa finché non vengono soddisfatti tutti i criteri dei test volumetrici e prestazionali;

- *approccio B – Progettazione volumetrica con ottimizzazione delle prestazioni:*

questo procedimento estende il precedente iniziando anch'esso con l'applicazione di un metodo volumetrico di progettazione della miscela per determinare un OBC preliminare (preliminary OBC). Vengono quindi eseguiti test prestazionali su campioni con OBC preliminare più altri due o più set di campioni con variazione del contenuto di bitume rispetto all'OBC preliminare stesso. L'OBC finale è il contenuto di legante che soddisfa tutti i criteri prestazionali (anche dei provini variati) in seguito

all'esecuzione dei vari test. Anche in questo caso, si ripete il processo di progettazione del mix variando materiali o proporzioni delle componenti qualora non si trovi un contenuto di legante adatto;

- *approccio C – Progettazione volumetrica con prestazioni modificate:*

questo metodo segue una procedura simile ai precedenti per stabilire proprietà preliminari dei materiali e il contenuto di legante (preliminary binder content PBC) applicando i metodi volumetrici sopra citati. Gli stessi risultati dei test prestazionali vengono utilizzati per regolare il contenuto di legante e/o le proporzioni delle componenti della miscela finché non sono soddisfatti tutti i vari criteri prestazionali, anche a discapito del soddisfacimento dei criteri volumetrici utilizzati tradizionalmente;

- *approccio D – Progettazione delle prestazioni:*

questa metodologia si concentra esclusivamente sull'analisi delle prestazioni ricavate dai vari test prestazionali senza seguire requisiti specifici per le proprietà volumetriche, aggiustando la miscela solo ed esclusivamente in base ai risultati dei test prestazionali. Una volta che i risultati dei test soddisfano tutti i criteri prestazionali, si possono controllare eventualmente le qualità volumetriche della miscela per il successivo utilizzo nella produzione.

Segue una rappresentazione grafica del funzionamento sequenziale dei vari approcci (Figura 8 a-d).

La Tabella 1 riassume le differenze nei quattro approcci BMD in termini di requisiti volumetrici e prestazionali, livello di flessibilità e potenziale di innovazione<sup>[22]</sup>.

Tabella 1 – Riassunto dei requisiti volumetrici e prestazionali, flessibilità e potenziale di innovazione degli approcci BMD.

Approccio BMD	Requisiti volumetrici	Requisiti prestazionali	flessibilità	Potenziale di innovazione
A	Conformità totale	Conformità totale	Il più conservativo	Il più basso
B	Conformità totale all'OBC preliminare	Ottimizzazione delle prestazioni attraverso modifiche moderate del contenuto di legante bituminoso	Leggermente più flessibile rispetto all'approccio A	Limitato
C	Alcuni requisiti sono stati ridotti o eliminati	Ottimizzazione delle prestazioni mediante l'aggiustamento del PBC o delle proprietà dei componenti della miscela o proporzioni	Meno conservativo rispetto all'approccio A e all'approccio B	Grado medio
D	Requisiti limitati o assenti	Ottimizzazione delle prestazioni mediante l'aggiustamento dei componenti e delle proporzioni della miscela	Il meno conservativo	Massimo grado

### APPROCCIO A

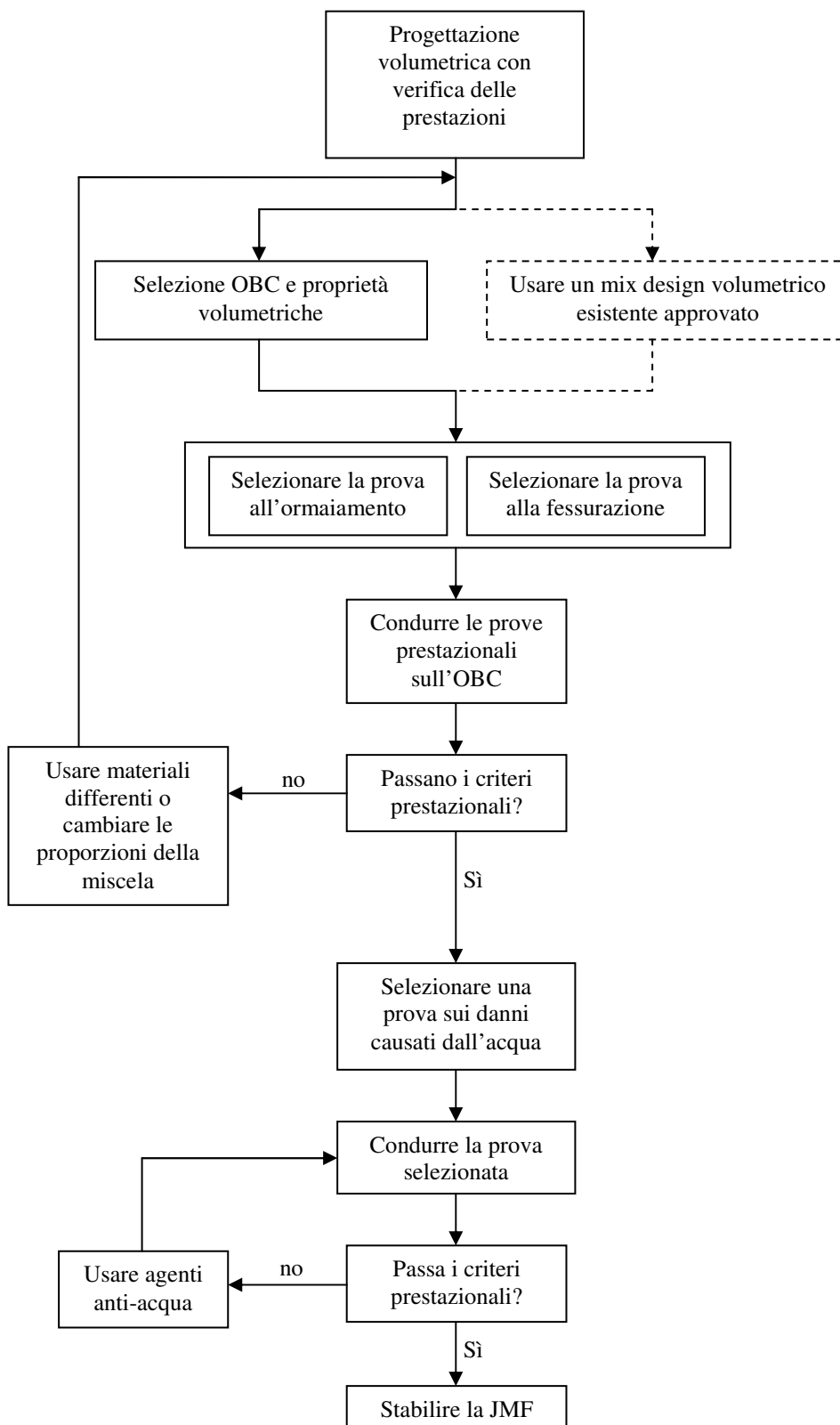


Figura 8-a) Approccio A – Progettazione volumetrica con verifica delle prestazioni.

## APPROCCIO B

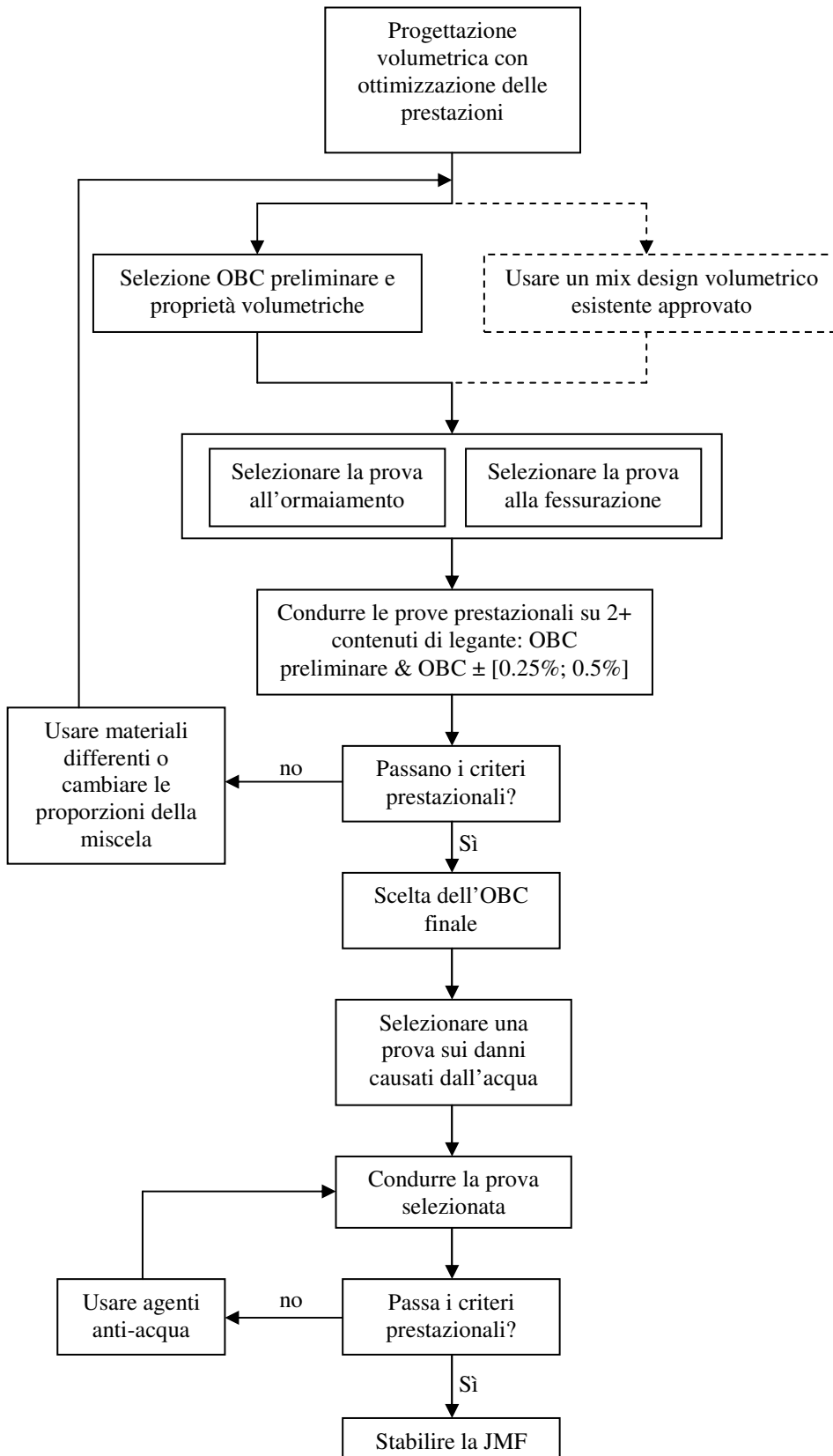


Figura 8-b) Approccio B – Progettazione volumetrica con ottimizzazione delle prestazioni.

### APPROCCIO C

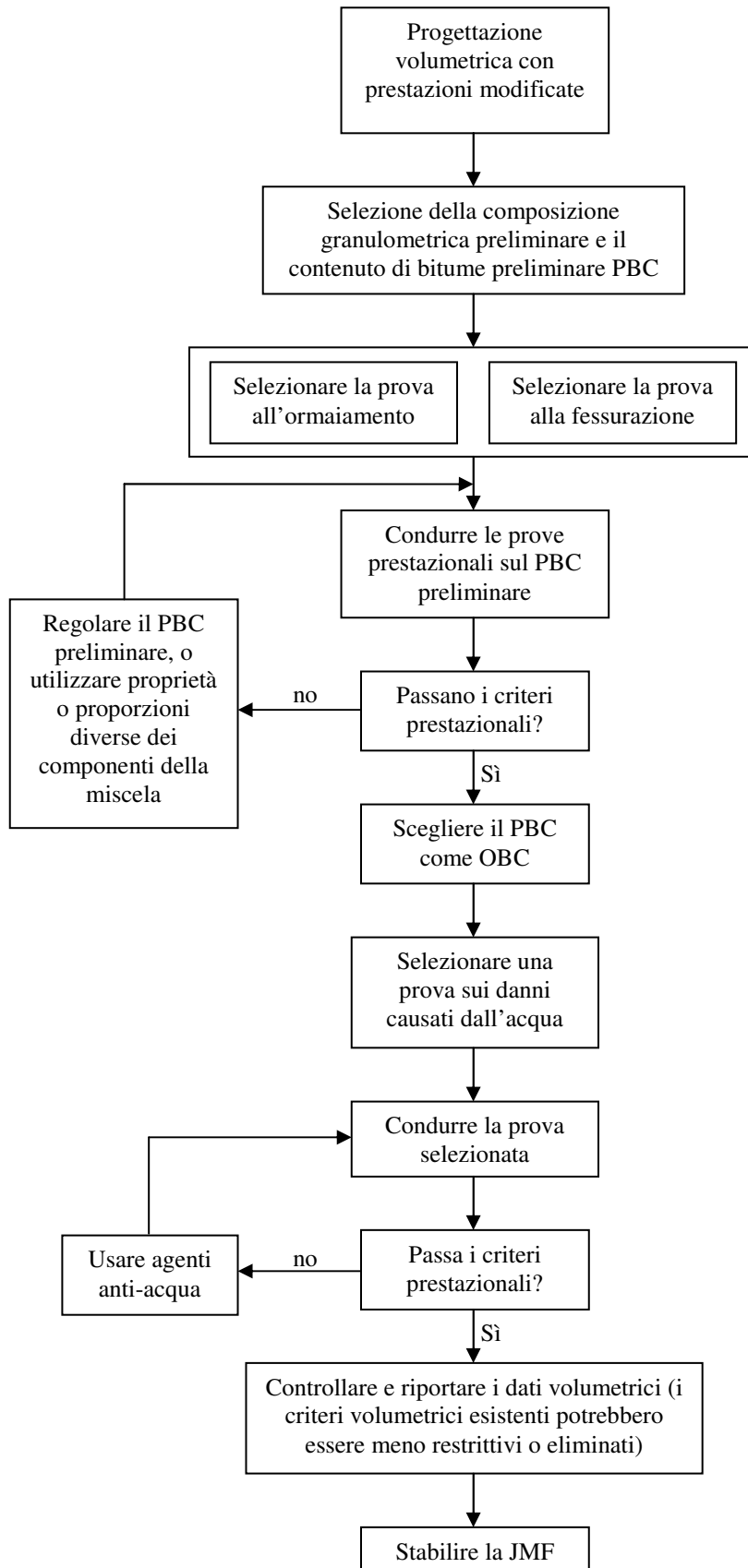


Figura 8-c) Approccio C – Progettazione volumetrica con prestazioni modificate.



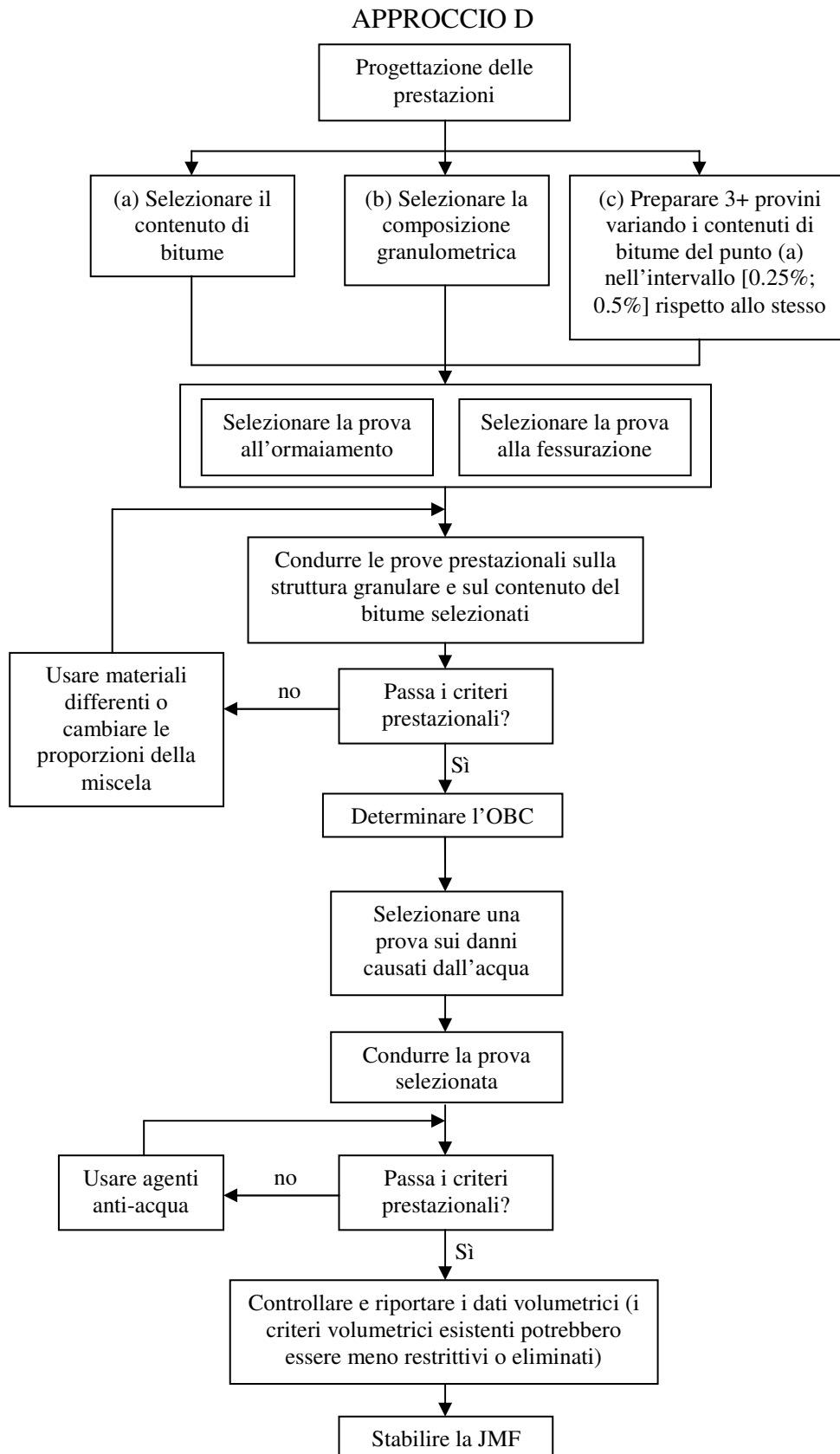


Figura 8-d) Approccio D – Progettazione delle prestazioni.

## **2.4. GUIDA SULLA FABBRICAZIONE DEI CAMPIONI DI MISCELA BITUMINOSA PER I TEST PRESTAZIONALI BMD**

La corretta preparazione dei provini destinati ai test prestazionali secondo il metodo BMD è fondamentale per garantire risultati accurati e affidabili. Il seguente procedimento dettagliato si basa su linee guida standardizzate<sup>[23,24]</sup> ed è stato sviluppato per assicurare che ogni campione sia preparato con precisione e coerenza, rispettando rigorosi criteri di qualità e uniformità:

1. lavorazione degli aggregati: gli aggregati devono essere essiccati in forno a 230°F (110°C) secondo AASHTO T255 fino a completa asciugatura, solitamente per una notte. Se viene scelto come aggregato il RAP, è preferibile l'asciugatura con ventilatore per evitare la perdita di polveri fini. Nel caso, l'asciugatura in forno per RAP non deve superare i 140°F (60°C) per ridurre l'ossidazione del bitume. Dopo l'asciugatura, il materiale deve essere suddiviso seguendo AASHTO R47. Il frazionamento degli aggregati migliora l'accuratezza della granulometria finale. I metodi di frazionamento sono descritti nel manuale MS-2 dell'Asphalt Institute;
2. dosaggio degli aggregati: il dosaggio degli aggregati viene eseguito utilizzando una paletta piatta ponendo gli ingredienti su un contenitore a fondo piatto per evitare la segregazione dei materiali fini, mescolando bene il campione fino a renderlo omogeneo. Gli aggregati, siano essi fini, grossolani o frazionati, vengono dosati sistematicamente. Se si utilizzano filler minerali o filler di recupero (ovvero particelle di polvere catturate dai gas di scarico degli impianti di miscelazione del conglomerato bituminoso), questi devono essere aggiunti al centro del mucchio di aggregati per ridurre la perdita di materiale durante il versamento. Ogni miscela deve essere pesata prima e dopo l'aggiunta di qualsiasi materiale. Ora le varie miscele vanno coperte per evitare la perdita di particelle e vanno etichettate in maniera chiara mediante l'uso di strumenti che resistano al calore. Se si utilizza il RAP, esso va dosato nello stesso modo appena descritto, ma posizionato in un contenitore separato, garantendo un contenuto di asfalto accurato per ottenere la giusta quantità di aggregato RAP nella miscela;

3. processo di riscaldamento e miscelazione della miscela di conglomerato bituminoso: il riscaldamento e la miscelazione della miscela bituminosa iniziano riscaldando gli aggregati a circa 20-50°F (4-10°C) sopra la temperatura di miscelazione, in base al contenuto di RAP presente nella stessa. Gli aggregati vergini devono essere riscaldati per almeno 3 ore in forno senza essere toccati. Il legante bituminoso viene riscaldato alla temperatura media o alta del range di miscelazione e deve essere agitato frequentemente per evitare variazioni di temperatura. Dopo aver combinato gli aggregati, il RAP e gli additivi vari, viene creato un solco nel contenitore di miscelazione nel quale aggiungere il legante bituminoso. La miscelazione continua fino a quando tutti gli aggregati sono completamente rivestiti, poi la miscela viene versata in una teglia per un breve invecchiamento;
4. campionamento, riscaldamento e suddivisione della miscela bituminosa: l'obiettivo di questa fase è ottenere campioni omogenei per i test prestazionali, minimizzando l'invecchiamento aggiuntivo in forno. Si consiglia di prelevare almeno il 25% di materiale in più del necessario e di preparare più campioni del necessario per ridurre la variabilità dei risultati dei test. I campioni, riscaldati una volta se lasciati raffreddare, devono essere omogeneizzati e divisi utilizzando un divisore meccanico. Dopo la suddivisione, i campioni devono essere riscaldati in padelle individualmente fino a raggiungere la temperatura di compattazione, evitando la segregazione del materiale durante il processo;
5. invecchiamento e compattazione della miscela: per l'invecchiamento a breve termine dei campioni LMLC (Laboratory-Mix, Laboratory-Compacted, ovvero campioni di miscela che sono stati miscelati e compattati in laboratorio al posto di essere prelevati da miscele preparate in un impianto di produzione), AASHTO R30 richiede due ore a 275°F (135°C) prima della compattazione. Le temperature e i tempi variano a seconda delle specifiche locali. Viene scelta una padella come contenitore in questa fase perché permette di ottenere uno spessore uniforme della miscela, circa di 25-50 mm. Dopo l'invecchiamento a breve termine, si

trasferisce la miscela in un'altra padella piatta, distribuendo il contenuto ad uno spessore massimo di 12,5 mm. Si riscalda la miscela nuovamente a 275°F. Prima della compattazione finale, si riscaldano anche gli stampi e si mescola la miscela, assicurando una distribuzione uniforme nella fustella di compattazione secondo AASHTO T312. Si lascia raffreddare completamente il provino prima di determinare la gravità specifica apparente.

A questo punto i provini sono pronti per essere testati secondo le varie prove per verificarne i parametri prestazionali fino a qui menzionati.

Per una spiegazione più dettagliata, la NAPA (National Asphalt Pavement Association) ha messo a disposizione nel proprio sito (nella sezione risorse del BMD) un video illustrativo<sup>[24]</sup> del procedimento appena descritto, evidenziando, oltre che i passaggi fondamentali, anche errori da evitare e accorgimenti vari da tenere in considerazione.

## **2.5. PANORAMICA SULLE PRESTAZIONI DELLE MISCELE DERIVANTI DALL'USO DEL BMD**

Ottenere prestazioni bilanciate della miscela è fondamentale per una pavimentazione di lunga durata. Nella figura 9 vengono messi in relazione il contenuto di bitume e le prestazioni delle pavimentazioni stradali, in termini di stabilità e durabilità. Le due curve principali mostrano come variano la stabilità e la durabilità al variare della quantità di bitume. Analizzandole possiamo notare che:

- la curva di stabilità aumenta fino a raggiungere un picco (massima stabilità) e poi diminuisce con l'aumento ulteriore del contenuto di bitume. Il punto di massima stabilità rappresenta il contenuto ottimale di bitume che si dovrebbe utilizzare per ottenere la massima stabilità della pavimentazione;
- la curva di durabilità, a differenza di quella della stabilità, aumenta costantemente con l'incremento del contenuto di bitume, raggiungendo un picco (massima durabilità) senza mai diminuire. Il punto di massima durabilità rappresenta il contenuto ottimale di bitume che si dovrebbe utilizzare per ottenere la massima durabilità della miscela.

Come si può notare dalle curve, i punti di massimo di ognuna fanno sì che l'altra caratteristica non sia altrettanto buona in quella stessa percentuale di bitume. Per bilanciare la miscela bisogna quindi ricercare il giusto compromesso per esaltare entrambe le qualità: la zona centrale, indicata come “progettazione contenuto di bitume”, rappresenta il range di tolleranza entro cui il contenuto di bitume deve essere mantenuto per bilanciare stabilità e durabilità. Questa zona è definita anche dalla stabilità minima consentita per un dato carico di traffico e compresa dai valori ottimali di bitume che assicurano buone prestazioni complessive della pavimentazione. Il contenuto di bitume deve essere sufficientemente alto da garantire durabilità, ma non così alto da compromettere la stabilità. Ovviamente, da un punto di vista costruttivo, saranno poi necessarie considerazioni riguardanti la lavorabilità per ottenere la densità in loco desiderata dello strato di pavimentazione.

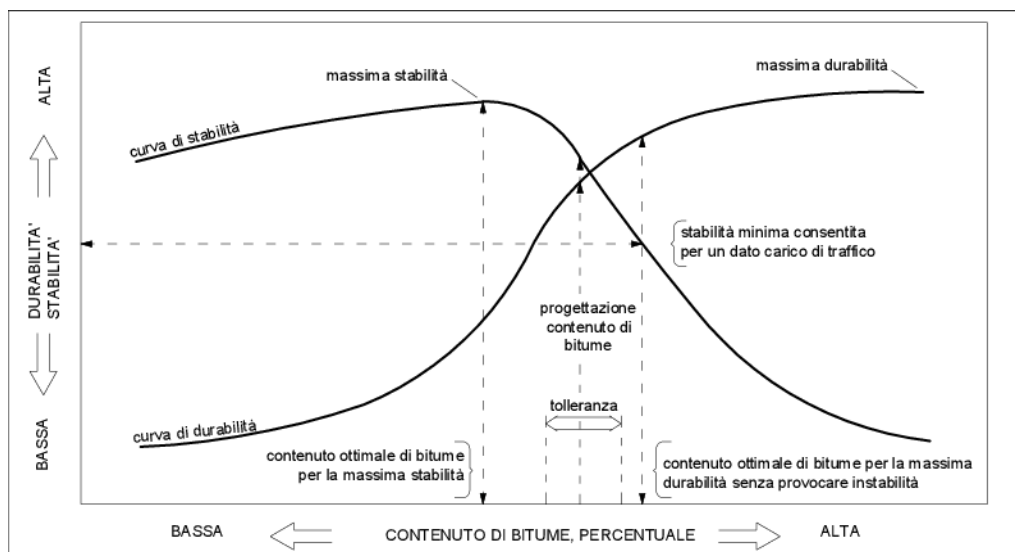


Figura 9- Grafico contenuto di bitume - stabilità/durabilità.

L'immagine mostra quindi l'importanza di trovare un equilibrio ottimale nel contenuto di bitume per garantire che le pavimentazioni stradali abbiano sia la necessaria stabilità che la desiderata durabilità.

## 2.6. TEST PRESTAZIONALI UTILIZZABILI CON IL BMD

I test prestazionali costituiscono la base del processo BMD. A seconda del metodo di prova e della configurazione, un test prestazionale può risultare in un parametro indicativo (per valutare e confrontare le prestazioni di una miscela), un parametro meccanicistico, un modello prestazionale sviluppato in laboratorio o una combinazione di questi. I parametri indicativi devono essere correlati alle sollecitazioni della pavimentazione sul campo. Se una miscela di conglomerato bituminoso non soddisfa uno o più dei criteri prestazionali stabiliti, sarebbero necessari aggiustamenti della job mix formula (JMF), variando quantità e/o tipologia di bitume e di materiali aggregati.

La scelta di una specifica prova viene fatta tenendo in considerazione diversi fattori:

- preparazione del campione: viene valutato lo sforzo necessario per la preparazione del campione e la relativa strumentazione;
- condizionamento e prova dei campioni: viene valutato il tempo necessario per ottenere un campione valido pronto ad essere testato;
- esigenze formative e applicabilità: si valuta il livello di formazione necessario per il funzionamento delle apparecchiature e l'analisi dei dati, l'idoneità del test sia per i campioni generati in laboratorio che per le carote ricavate sul campo, nonché la capacità del test di essere utilizzato in un laboratorio mobile per l'accettazione sul campo e/o controllo di qualità;
- costo dell'attrezzatura: valutato in base al livello di investimento finanziario per l'acquisizione di nuove attrezzature o modifica di quelle esistenti per la preparazione e l'analisi dei campioni;
- ripetibilità: si valuta il livello del coefficiente di variazione (COV) associato a misurazioni ripetute su diversi campioni analizzati in un singolo laboratorio;
- sensibilità del materiale: viene valutato in base allo stato degli studi di analisi di sensibilità esistenti a livello nazionale e locale, nonché al livello di significatività della sensibilità del parametro indicativo rispetto alle proprietà o proporzioni dei componenti della miscela (ad esempio,

aggregati, bitume, materiali riciclati, additivi), ai vuoti d'aria e all'invecchiamento;

- convalida sul campo: valutato in base allo stato degli sforzi nazionali e locali esistenti condotti per la correlazione e la validazione del parametro indice del test con i dati di prestazione misurati sul campo, nonché ai benefici aggiuntivi dei risultati dei test prestazionali per l'uso nelle analisi meccanicistiche, rafforzando così gli sforzi di validazione sul campo.

Considerando i molteplici meccanismi di innesco e propagazione delle fessurazioni, i test prestazionali delle miscele possono essere categorizzati in diverse tipologie, tra cui la fessurazione termica, la fessurazione per riflessione, la fessurazione per fatica dal basso verso l'alto, la rottura per fatica dall'alto verso il basso, ormaiamento e danni causati dall'acqua. Nella tabella 2 sono elencate le prove di laboratorio comunemente utilizzate nella ricerca sul conglomerato bituminoso<sup>[20]</sup>, alcune delle quali già adottate dai Dipartimenti dei Trasporti statunitensi (DOT) per l'approvazione del BMD. Tuttavia, nonostante la loro importanza, è importante sottolineare che attualmente manca un processo ben definito per lo sviluppo e l'implementazione di tali prove. Di conseguenza, molti dei test proposti possono presentare lacune o necessitare di ulteriori passaggi per essere pienamente adottati nella pratica.

Tabella 2 – Test prestazionali delle miscele di conglomerato bituminoso comunemente utilizzati nel BMD.

<b>Proprietà della miscela</b>	<b>Test di laboratorio</b>	<b>Norma di riferimento</b>
Fessurazione termica	Disk-shaped compact tension test	ASTM D7313-13
	Indirect tensile (IDT) test	AASHTO T 322-07
	Semi-circular bend (SCB) test	AASHTOTP 105-13
	Thermal stress restrained specimen test	Norma EN 12697-4
Fessurazione di riflessione	Disk-shape compact tension test	ASTM D7313-13
	Texas overlay test	TxDOT Tex-248-F NJDOT B-10
	Illinois flexibility index test	AASHTOTP 124-16
Fessurazione per fatica dal basso verso l'alto	Direct tension cyclic fatigue test	AASHTOTP 107-14
	Flecural bending beam fatigue test	AASHTO T321 ASTM D7460
	IDT fracture energy test	N/A
	Illinois Flexibility index test	AASHTOTP 124-16
	SCB at intermediate temperature	LaDOTD TR 330-14 ASTM D8044-16
	Texas overlay test	TxDOT Tex-248-F
Rottura per fatica dall'alto verso il basso	Direct tension test	N/A
	IDT energy ratio test	N/A
	Illinois flexibility index test	AASHTOTP 124-16
Ormaiamento	Asphalt pavement analyzer	AASHTO T340
	Flow number	AASHTOTP79-15
	Hamburg wheel tracking test	AASHTO T324
	Superpave shear tester	AASHTOT T 320-07
	Triaxial stress sweep test	AASHTOTP 116-15
Sensibilità all'acqua	Hamburg wheel tracking test	AASHTO T324
	Tensile strength ratio	AASHTO T283



## **2.7. CONFORNTO TRA IL BMD E I METODI VOLUMETRICI TRADIZIONALI**

In questo paragrafo si vogliono evidenziare le principali differenze tra questo innovativo metodo e i suoi predecessori. In realtà, il BMD non rappresenta una rivoluzione totale. Come evidenziato nella Tabella 3, molti dei passaggi utilizzati nei metodi tradizionali, come Marshall e Hveem, sono ancora concettualmente presenti nel BMD. Tuttavia, la differenza principale risiede nell'integrazione dei test prestazionali nel BMD, che permettono di valutare la resistenza alle deformazioni e la durabilità della miscela in modo più completo, adattando e modificando la miscela stessa in base ai risultati dei test, uscendo dagli schemi classici di progettazione mediante regole e criteri volumetrici che spesso possono risultare inadatti al luogo in cui si trova la pavimentazione di conglomerato bituminoso.

Questo approccio consente di sviluppare miscele di conglomerato bituminoso non solo conformi ai requisiti volumetrici, ma anche ottimizzate per prestazioni superiori nel lungo termine, rispondendo così alle sfide moderne delle infrastrutture stradali.

Tabella 3 – Passaggi presenti nel BMD e nei metodi tradizionali.

<b>Passaggio nel metodo</b>	<b>Marshall</b>	<b>Hveem</b>	<b>BMD</b>
Selezione tipo di bitume	SÌ	SÌ	SÌ
Selezione aggregati non riciclati	SÌ	SÌ	SÌ
Selezione materiali riciclati	SÌ	SÌ	SÌ
Provini compattati con differenti percentuali di bitume	SÌ	SÌ	SÌ
Calcolo proprietà volumetriche	SÌ	SÌ	SÌ
Condurre test prestazionali sulla stabilità	SÌ (metodo della stabilità Marshall)	SÌ (stabilometro Hveem)	SÌ (preferenza dell'utente)
Condurre test prestazionali sulla durabilità	SÌ (scorrimento Marshall)	SÌ (coesiometro Hveem)	SÌ (preferenza dell'utente per lo specifico tipo di deterioramento)
Valutazione dei test prestazionali rispetto ai criteri specifici sviluppati per la miscela	SÌ	SÌ	SÌ
Selezionare OBC	SÌ	SÌ	SÌ
Determinare le proprietà volumetriche all'OBC	SÌ	SÌ	SÌ
Valutazione alla suscettibilità all'acqua all'OBC	SÌ	SÌ	SÌ
Controllo della miscela durante la produzione	SÌ (proprietà volumetriche)	SÌ (proprietà volumetriche)	SÌ (proprietà volumetriche e/o test prestazionali)

## **2.8. PROCESSO DI IMPLEMENTAZIONE DEL BMD PER I GESTORI STRADALI**

Gli obiettivi per l'attuazione del BMD possono variare in funzione delle differenti esigenze delle amministrazioni stradali. Inizialmente, alcune potrebbero desiderare di aggiungere solo test prestazionali, mentre altre potrebbero voler sostituire alcuni criteri esistenti con nuovi criteri delle prove di laboratorio come parte del programma per l'approvazione del mix design e quello per l'assicurazione della qualità (quality assurance QA).

Le pratiche di successo documentate da coloro che hanno utilizzato il BMD per progettare miscele di conglomerato bituminoso sono state raccolte e sintetizzate in un processo complessivo per l'implementazione del BMD. Questo lavoro ha suggerito otto compiti principali<sup>[25]</sup>, basati su attività che possono essere svolte contemporaneamente, come ad esempio i workshop regionali sul BMD e la guida all'implementazione del BMD. I compiti e i relativi sottocompiti sono presentati in una tabella (Tabella 4) e riassumono le attività suggerite che un gestore potrebbe dover intraprendere per implementare un programma BMD. Non tutti i compiti potrebbero essere applicabili o considerati da un gestore, poiché ciò dipende dalla struttura organizzativa, dal livello del personale, dallo spazio di lavoro disponibile, dal quantitativo annuale di conglomerato bituminoso posto in opera e dalle esperienze delle pratiche settoriali. È importante notare che l'adozione di questi compiti non è obbligatoria a livello federale, lasciando quindi flessibilità ai vari gestori. Sebbene esistano sequenze logiche per alcune attività, alcune di esse possono essere svolte in parallelo o in un ordine diverso senza conseguenze negative.

Le sezioni seguenti descrivono le varie attività per l'implementazione della BMD.

Tabella 4 – Otto potenziali compiti per l’implementazione del BMD.

Compito		Sottocompito	Descrizione
1	Motivations and benefits	-	
2	Overall planning	2.1	Identification of champions
		2.2	Establishing a stakeholders collaboration
		2.3	Doing homework
		2.4	Establishing goals
		2.5	Mapping the tasks
		2.6	Identifying available external technical information and support
		2.7	Developing an implementation timeline
3	Selecting performance tests	3.1	Identify primary modes of distress
		3.2	Identifying and assessing performance test appropriateness
		3.3	Validating the performance tests
4	Performance testing equipment: acquiring, managing resources, training, and evaluating	4.1	Acquiring equipment
		4.2	Managing resources
		4.3	Conducting initial training
		4.4	Evaluating performance tests
		4.5	Conducting inter-laboratory studies
5	Establishing baseline data	5.1	Rewiewing historical data & information management system
		5.2	Conducting benchmarking studies
		5.3	Conducting shadow projects
		5.4	Analyzing production data
		5.5	Determining how to adjust asphalt mixtures containing local materials
6	Specifications and program development	6.1	Sampling and testing plans
		6.2	Pay adjustment factors (if part of the goals)
		6.3	Developing pilot specifications and policies
		6.4	Conducting pilot projects
		6.5	Final analysis and specification revisions
7	Training, certifications, and accreditations	7.1	Developing and/or updating training and certification programs
		7.2	Establishing or updating laboratory accreditation program requirements
8	Initial implementation	-	

### **2.8.1. COMPITO 1: MOTIVAZIONI E BENEFICI DEL BMD**

Questo compito mira a garantire una comprensione delle motivazioni di adottare un nuovo approccio nella progettazione e accettazione delle miscele di conglomerato bituminoso. Tale motivazione può variare considerevolmente tra i diversi enti stradali in base alle proprie esigenze territoriali. Un motivo comune risiede nelle limitazioni delle metodologie tradizionali di progettazione, le quali possono risultare in prestazioni non ottimali e mancanza di innovazione.

Per quanto concerne i benefici potenziali derivanti dall'implementazione del Balanced Mix Design (BMD), si possono elencare:

- miglioramento della qualità delle miscele di conglomerato bituminoso: il BMD promette un aumento della qualità delle miscele di conglomerato bituminoso attraverso l'adozione di metodi più avanzati di progettazione e produzione;
- produzione di miscele economicamente vantaggiose: il BMD consente la produzione di miscele di conglomerato bituminoso che, oltre a soddisfare le specifiche di progetto in termini prestazionali, possono essere economicamente vantaggiose;
- miglioramento generale della rete stradale statale: l'implementazione del BMD può portare a miglioramenti generali nelle condizioni delle pavimentazioni, contribuendo ad una maggiore durabilità e resistenza alle sollecitazioni del traffico;
- utilizzo di additivi innovativi: il BMD apre la strada all'impiego di additivi innovativi per migliorare le proprietà delle miscele di conglomerato bituminoso, consentendo soluzioni più avanzate e sostenibili;
- requisiti volumetrici meno rigidi: il BMD offre una maggiore flessibilità nei requisiti volumetrici delle miscele consentendo una migliore adattabilità alle specifiche esigenze del progetto;
- metodi di approvazione e accettazione più robusti: il BMD introduce metodi più solidi per l'approvazione della progettazione e l'accettazione della produzione delle miscele di conglomerato bituminoso, garantendo una maggiore coerenza e affidabilità nei processi decisionali.

### **2.8.2. COMPITO 2: PIANIFICAZIONE GENERALE**

Questa attività verte sulla comprensione complessiva del processo di implementazione, che implica la definizione e la fissazione degli obiettivi del gestore stradale e la determinazione delle risorse necessarie per raggiungerli, rispettando una tempistica realistica. Il conseguimento di tali obiettivi richiede un coordinamento efficace e la creazione di partnership con le parti interessate.

### **2.8.3. COMPITO 3: SELEZIONE DEI TEST PRESTAZIONALI**

Questa fase implica l'analisi delle principali cause di deterioramento delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso e la scelta dei test prestazionali della miscela che hanno una stretta correlazione con le prestazioni effettive sul campo. Ciò richiede la pianificazione dei metodi per la validazione dei test prestazionali.

### **2.8.4. COMPITO 4: APPARECCHIATURE PER IL TEST DELLE PRESTAZIONI: ACQUISIZIONE, GESTIONE DELLE RISORSE, FORMAZIONE E VALUTAZIONE**

Questo compito si focalizza sull'acquisizione delle apparecchiature necessarie per i test delle prestazioni, sulla gestione efficiente delle risorse disponibili, sull'implementazione di programmi formativi iniziali, sulla valutazione dei risultati dei test delle prestazioni e sulla conduzione di studi interlaboratorio (InterLaboratory Studies ILS).

### **2.8.5. COMPITO 5: STABILIRE I DATI DI RIFERIMENTO**

Questo compito richiede la determinazione dei dati di base essenziali per lo sviluppo dei criteri di test delle prestazioni e delle relative specifiche. Tale processo comprende:

- utilizzo delle esperienze pregresse relative ai test prestazionali delle miscele di conglomerato bituminoso;
- analisi comparativa delle configurazioni delle miscele esistenti mediante l'impiego di specifici test prestazionali selezionati;
- acquisizione di campioni aggiuntivi durante il corso del progetto per condurre test di prestazione paralleli;

- rilevamento e analisi della variabilità produttiva nei risultati dei test prestazionali;
- valutazione della sensibilità dei test rispetto alle proprietà o alle proporzioni dei componenti della miscela di conglomerato bituminoso (quali aggregati, leganti bituminosi, materiali riciclati, additivi), nonché ai parametri volumetrici (quali vuoti d'aria) e al fenomeno dell'invecchiamento.

#### **2.8.6. COMPITO 6: SPECIFICHE E SVILUPPO DEL PROGRAMMA**

Questo compito mira a stabilire i criteri di progettazione della miscela destinati all'implementazione nelle specifiche prima della realizzazione dei progetti pilota. Questo processo implica la definizione dei criteri per i test delle prestazioni basati sui dati raccolti dalle prove di validazione sul campo, dagli studi sulla variabilità e dai dati di riferimento disponibili. Se necessario, potrebbe anche essere sviluppata una fase di accettazione preliminare. Questa fase comporterebbe la scelta delle misure di qualità adeguate, delle caratteristiche di accettazione della qualità (AQC) e dei limiti preliminari delle specifiche AQC per ciascun test utilizzando le informazioni già disponibili dal programma di QA dei gestori stradali. Inoltre, la selezione delle caratteristiche qualitative appropriate per il controllo di qualità (quality control QC) potrebbe essere completata sfruttando le informazioni derivanti dalle attività sopra menzionate.

#### **2.8.7. COMPITO 7: FORMAZIONE, CERTIFICAZIONI E ACCREDITAMENTI**

Il Compito 7 è dedicato allo sviluppo o all'aggiornamento dei programmi di qualificazione dei tecnici e dei laboratori preesistenti. Inoltre, si concentra sulla fornitura di seminari formativi relativi ai progetti iniziali.

#### **2.8.8. COMPITO 8: IMPLEMENTAZIONE INIZIALE NELLA PRATICA INGEGNERISTICA**

Questa attività implica l'implementazione iniziale da parte di un gestore stradale del BMD e dei requisiti prestazionali nel proprio programma di pavimentazione in

conglomerato bituminoso. Tale processo comprende la definizione dei criteri per la selezione dei progetti e l'istituzione di cicli di feedback per garantire un impegno coordinato, collaborativo e costante verso la piena adozione del BMD.

## **2.9. APPLICAZIONI ATTUALI DEL BMD**

Essendo un nuovo approccio sviluppato negli ultimi anni, il BMD non ha ancora trovato sviluppo sistematico a livello mondiale. Il suo pieno utilizzo è limitato ad alcuni stati appartenenti agli USA, tra i quali California, Illinois, Iowa, Louisiana, New Jersey e Texas che hanno già sperimentato o implementato la BMD nei propri programmi di pavimentazione in conglomerato bituminoso. Le esigenze e il tipo di approccio non sono però tutti uguali:

- la California ha adottato un quadro per le miscele BMD che include specifiche basate sulle prestazioni e il suo programma di progettazione empirico-meccanicistica, CallME. Il protocollo di test delle prestazioni include la prova *repeate simple shear test*, la prova *bending beam fatigue (BBF)* e la prova *Hamburg wheel-track test (HWTT)*<sup>[26]</sup>;
- il DOT dell'Illinois sta implementando l'approccio BMD A, richiedendo test specifici come HWTT, Illinois Flexibility Index (I-FIT) e una versione modificata del Tensile Strength Ratio Test per valutare vari aspetti delle prestazioni della miscela;<sup>[27]</sup>
- l'Iowa DOT, pur utilizzando principalmente l'approccio volumetrico Superpave, valuta la resistenza all'ormaiamento utilizzando HWTT per alcune miscele specifiche progettate per traffico molto elevato e/o con particolare mineralogia dell'aggregato. Sta anche considerando l'uso del *disc-shaped compact tension test* per valutare la fessurazione termica<sup>[28]</sup>;
- il Louisiana DOT ha implementato l'approccio BMD A utilizzando criteri volumetrici convenzionali insieme a test specifici come *loaded wheel tracking* e *semi-circular bending (SCB)* per valutare la formazione di ormaiamento e fessurazioni a temperatura intermedia, rispettivamente<sup>[29,30]</sup>;
- il DOT del New Jersey utilizza l'approccio BMD A su vari tipi di miscele di conglomerato bituminoso e sta considerando l'utilizzo di prove più rapide



come lo indirect tensile test (IDT) per valutare la fessurazione e l'ormaiamento<sup>[31]</sup>;

- il DOT del Texas utilizza l'approccio BMD A per miscele di conglomerato bituminoso di alta qualità e richiede test specifici come HWTT e OT per valutare vari aspetti delle prestazioni della miscela<sup>[32]</sup>;

Altri stati, tra cui Florida, Georgia, Indiana, Minnesota, Nebraska, New Hampshire, New Mexico, Ohio, Oklahoma, Oregon, South Dakota, Utah e Wisconsin, stanno attualmente lavorando per implementare il BMD nei propri programmi di ricerca e progettazione.

Per quanto riguarda il nostro territorio e continente, ci sono stati dei tentativi e interessamenti per l'utilizzo e studio del BMD in Europa e potenzialmente anche in Italia:

- progetti di ricerca: in Europa, vari progetti di ricerca hanno studiato il Balanced Mix Design per le sue potenzialità nel migliorare le prestazioni delle pavimentazioni stradali. Questi progetti spesso coinvolgono università, istituti di ricerca e collaborazioni internazionali. Ad esempio, la conferenza "Eurasphalt & Eurobitume Congress" è un evento dove vengono presentati i progressi nel campo della pavimentazione, inclusi studi sul BMD;
- adozione da parte di alcuni paesi: paesi come il Regno Unito, la Germania e i Paesi Bassi hanno mostrato interesse per il BMD. Questi paesi stanno conducendo studi e ricerche per valutare l'applicabilità del BMD alle proprie condizioni locali. La Germania, in particolare, ha un forte interesse per le innovazioni nel campo delle pavimentazioni e potrebbe essere uno dei paesi che esplorerà maggiormente l'uso di tale metodologia;
- collaborazioni internazionali: l'ERANET Road (un'iniziativa di ricerca stradale europea) ha finanziato progetti che potrebbero includere componenti del BMD come parte della loro ricerca sull'innovazione nelle pavimentazioni stradali.

Per quanto riguarda l'Italia, fino ad oggi, non ci sono molti documenti pubblicati che dettagliano l'uso estensivo del BMD nel territorio. Tuttavia, ci sono alcuni segnali di interesse e attività:

- alcuni enti di ricerca italiani e università potrebbero essere coinvolti in progetti pilota (sono punti di partenza per le organizzazioni che voglio implementare metodologie differenti nei vari ambiti) o studi comparativi che esplorano l'efficacia del BMD rispetto ai metodi tradizionali;
- le università italiane con gruppi di ricerca attivi nel settore dei materiali stradali stanno conducendo ricerche preliminari o tesi di laurea su questo argomento, esplorando la fattibilità e le prestazioni del BMD nelle condizioni italiane.

## **2.10. RUOLO DELLA SOSTENIBILITÀ DEL METODO BMD**

I vari enti statali hanno discusso come i test meccanici del BMD consentano di valutare la resistenza delle miscele di conglomerato bituminoso ai disturbi comuni e di utilizzare materiali sostenibili e innovativi. L'uso di materiali riciclati può aiutare a raggiungere obiettivi di basse emissioni di carbonio e aumentare la durata delle pavimentazioni. Illinois, Indiana, Minnesota e Missouri partecipano al programma FHWA Climate Challenge per quantificare le emissioni delle pavimentazioni sostenibili. Sono state identificate opportunità per integrare il BMD nella sostenibilità, estendendo la vita utile delle pavimentazioni e riducendo le emissioni di carbonio attraverso l'uso di materiali locali e RAP. Tuttavia, sono state evidenziate difficoltà nella quantificazione dei miglioramenti ambientali e nell'integrazione dei dati del BMD con le pratiche di gestione patrimoniale. La comunicazione dei benefici e dei successi del BMD è fondamentale per facilitarne l'implementazione. Inoltre, sono stati discussi i programmi di sovrapposizione del conglomerato bituminoso per la sostenibilità, esplorando se il BMD può contribuire a raggiungere la durata prevista nel progetto strutturale.<sup>[33]</sup>

## CONCLUSIONI

Il Balanced Mix Design (BMD) rappresenta un significativo avanzamento nel campo della progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso, combinando innovazione e prestazioni ottimali. Tradizionalmente, la progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso si è basata su criteri volumetrici, come il metodo Marshall o il Superpave, che si concentrano principalmente sulle proprietà fisiche e sulla composizione della miscela. Tuttavia, questi metodi non sempre riescono a prevedere accuratamente le prestazioni a lungo termine in termini di resistenza alle deformazioni permanenti (ormaiamento) e alla fessurazione.

Il BMD introduce un cambiamento paradigmatico integrando test prestazionali specifici nella fase di progettazione. Questo approccio permette di ottenere una miscela che non solo soddisfa i requisiti volumetrici, ma che è anche ottimizzata per resistere alle condizioni reali di carico e ambiente. Una delle principali innovazioni del BMD è l'inclusione di test meccanici, come il Flow number test e il Semi-circular bend test, che valutano rispettivamente la resistenza all'ormaiamento e alla fessurazione. Questo consente di bilanciare efficacemente le prestazioni della miscela, riducendo la probabilità di difetti prematuri e migliorando la durabilità complessiva della pavimentazione.

Una delle principali differenze chiave tra il BMD e i metodi tradizionali è l'approccio iterativo alla progettazione. Nel BMD, i risultati dei test prestazionali possono richiedere aggiustamenti nella composizione della miscela, come la modifica della curva granulometrica o l'ottimizzazione del contenuto di legante bituminoso. Questo processo iterativo assicura che la miscela finale sia ottimizzata per le condizioni specifiche di progetto, risultando in una pavimentazione più duratura e performante.

Guardando al futuro, il BMD offre numerose opportunità di sviluppo e miglioramento. Un'area di interesse è l'integrazione di nuove tecnologie e materiali, come i leganti modificati e gli additivi che possono ulteriormente migliorare le prestazioni delle miscele. Inoltre, l'adozione di tecniche di modellazione avanzata e intelligenza artificiale potranno rendere il processo di progettazione ancora più preciso ed efficiente. La raccolta e l'analisi dei dati sul

campo, attraverso il monitoraggio delle prestazioni delle pavimentazioni, forniranno feedback cruciali per affinare ulteriormente i criteri di progettazione.

Un altro importante sviluppo futuro riguarda l'adozione su larga scala del BMD da parte delle agenzie di trasporto e delle autorità stradali, non solo statunitensi, ma anche nel resto del mondo. Questo richiederà sforzi significativi in termini di formazione e aggiornamento delle competenze per i tecnici e gli ingegneri del settore, nonché l'aggiornamento delle normative e delle linee guida esistenti. La collaborazione tra istituti di ricerca, università e industria sarà fondamentale per facilitare questa transizione e garantire che i benefici del BMD siano pienamente realizzati.

In conclusione, il Balanced Mix Design rappresenta un approccio innovativo e lungimirante nella progettazione delle miscele di conglomerato bituminoso. Integrando test prestazionali specifici e un processo iterativo di ottimizzazione, il BMD promette di migliorare significativamente la durabilità e la resistenza delle pavimentazioni, offrendo soluzioni più efficaci e sostenibili per le infrastrutture stradali del futuro.

## BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] [https://www.superbeton.it/asfalti/ripristino\\_manto\\_stradale\\_1649767622/](https://www.superbeton.it/asfalti/ripristino_manto_stradale_1649767622/)
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Barber\\_Asphalt\\_Company](https://en.wikipedia.org/wiki/Barber_Asphalt_Company)
- [3] Browne, C. A. "Clifford Richardson." *Journal of Association of Official Agricultural Chemists* 15.4 (1932): iii-iv.
- [4] Richardson, Clifford. *The Modern Asphalt Pavement*. Wiley, 1905
- [5] Roberts, Fredy L., Louay N. Mohammad, and L. B. Wang. "History of hot mix asphalt mixture design in the United States." *Journal of Materials in Civil Engineering* 14.4 (2002): 279-293.
- [6] Evolution of the Hveem Stabilometer Method of Designing Asphalt Paving Mixtures. *Asphalt Paving Technology: Proceedings*, vol. 54. Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions, 11-13 February 1985. San Antonio, TX. pp. 243-265.
- [7] *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. National Asphalt Pavement Association Education Foundation. Lanham, MD.
- [8] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2000a). *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Twentieth Edition*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.
- [9] <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/mix-design/hveem-mix-design/>
- [10] Marshall Procedures for Design and Quality Control of Asphalt Mixtures. *Asphalt Paving Technology: Proceedings*, vol. 54. Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions, 11-13 February 1985. San Antonio, TX. pp. 265-284.
- [11] AASHTO T 245: Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using the Marshall Apparatus
- [12] <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/mix-design/marshall-mix-design/>

- [13] *Assessing the Results of the Strategic Highway Research Program*. Publication No. FHWA-SA-98-008. Federal Highway Administration. Washington D.C.
- [14] *HMA Construction*. Manual Series No. 22 (MS-22). Asphalt Institute. Lexington, KY.
- [15] AASHTO TP4: Preparing and Determining the Density of Hot-Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor
- [16] <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/mix-design/superpave-method/>
- [17] AASHTO T 283: Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture-Induced Damage.
- [18] NAPA IS-143 Balanced Mix Design Resource Guide, Fan Yin, Ph.D., P.E.; Randy C. West, Ph.D., P.E.
- [19] AASHTO PP 105 Standard Practice for Balanced Design of Asphalt Mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2020.
- [20] Transportation Research Circular E-C280: Glossary of Terms for Balanced Design of Asphalt Mixtures (2022)
- [21] West, R., C., Rodezno, F., Leiva, and F., Yin. Development of a Framework for Balanced Mix Design. Final Report to the National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Project NCHRP 20-07/Task 406, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2018.
- [22] Hajj, E.Y., T., Aschenbrener, and D., Nener-Plante. Examples of Successful Practices with State Implementation of Balanced Design of Asphalt Mixtures. Presentation at the Rocky Mountain Asphalt User Producer Group Fall Meeting, October 14, 2021.
- [23] NAPA IS-145 guide on Asphalt Mixture Specimen Fabrication for BMD Performance Testing, Nathan Moore & Adam Taylor, NCAT
- [24] <https://www.youtube.com/watch?v=hCjCVTvPWvY>
- [25] FHWA TechBrief: Balanced Asphalt Mix Design: Eight Tasks for Implementation (FHWA-HIF-22-048)

- [26] Harvey, J., R., Wu, J., Signore, I., Basheer, S., Holikatti, P., Vacura, and T. J., Holland. Performance-Base Specifications: California Experience to Date. Transportation Research Circular, Number E-C189, Application of Asphalt Mix Performance-Base Specifications, Washington, D.C., October 2014.
- [27] Al-Qadi, I. L., H. Ozer, Z. Zhu, P. Singhvi, U. M. Ali, M. Sawalha, A. F. E. Luque, J. J. G. Mainieri, and T. G. Zehr. Development of Long-Term Aging Protocol for Implementation of the Illinois Flexibility Index Test (I-FIT). FHWA-ICT-19-009. Illinois Center for Transportation, Urbana, IL, 2019.
- [28] West, R., C. Rodezno, F. Leiva, and F. Yin. Development of a Framework for Balanced Mix Design. National Center for Asphalt Technology, Auburn, TN, 2018.
- [29] Mohammad, L. N., M. Kim, and H. Challa. Development of Performance-based Specifications for Louisiana Asphalt Mixtures. FHWA/LA.14/558. Louisiana State University, Baton Rouge, LA, 2016.
- [30] Cooper S. B., III, W. B. King, and M. S. Kabir. Testing and Analysis of LWT and SCB Properties of Asphalt Concrete Mixtures. FHWA/LA/536. Louisiana Department of Transportation and Development, Baton Rouge, LA, 2016.
- [31] Bennert, T., E. Hass, E. Wass, and B. Berger. Indirect Tensile Testing for Balanced Mixture Design and Quality Control Performance Testing. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 89, 2020, pp. 363–390.
- [32] Texas Department of Transportation. Special Specification 3074: Superpave Mixtures—Balanced Mix Design. Austin, TX, 2019.
- [33] North Central Peer Exchange on Balanced Mix Design (BMD). Outcomes Summary Schaumburg, IL March 22–23, 2023.

Per ulteriori referenze fare riferimento a:

<https://www.asphaltpavement.org/expertise/engineering/resources/bmd-resource-guide/training-resources>