

2 LO STUDIO DELLE MISCELE (mix-design)

2.1 GENERALITA'

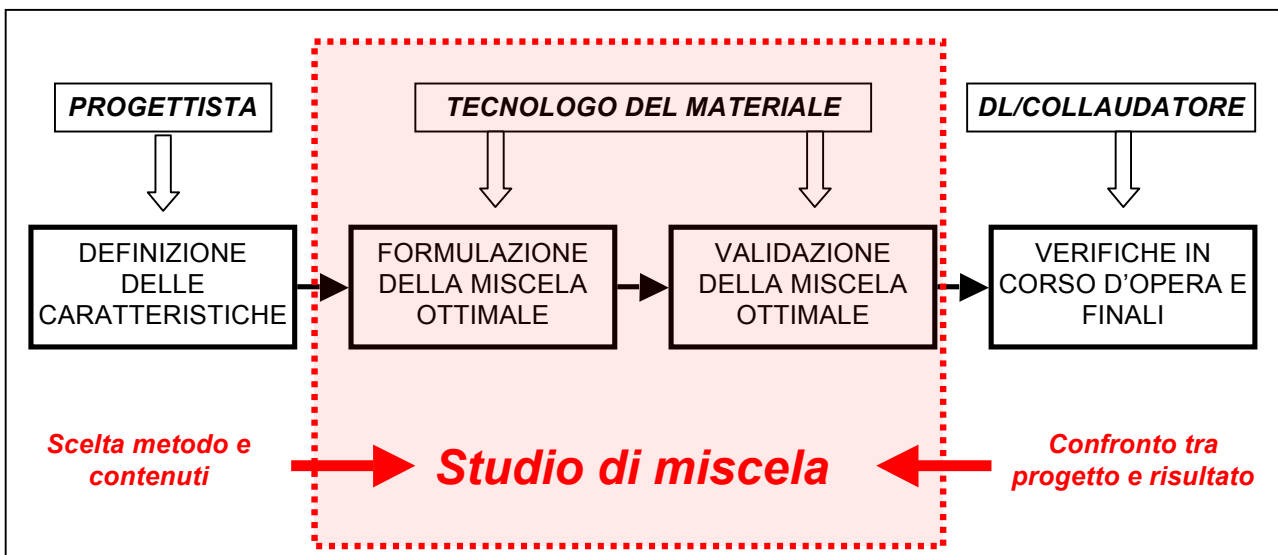
2.1.1 DEFINIZIONE E PECULIARITA'

Con "studio di miscela" (*mix-design*) si intende l'insieme di attività di studio e di laboratorio che consente di definire la composizione di una miscela, nel rispetto delle prescrizioni 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 implicano la conoscenza approfondita delle tecnologie produttive e costruttive, delle proprietà dei materiali e delle procedure di prova per la determinazione delle grandezze.

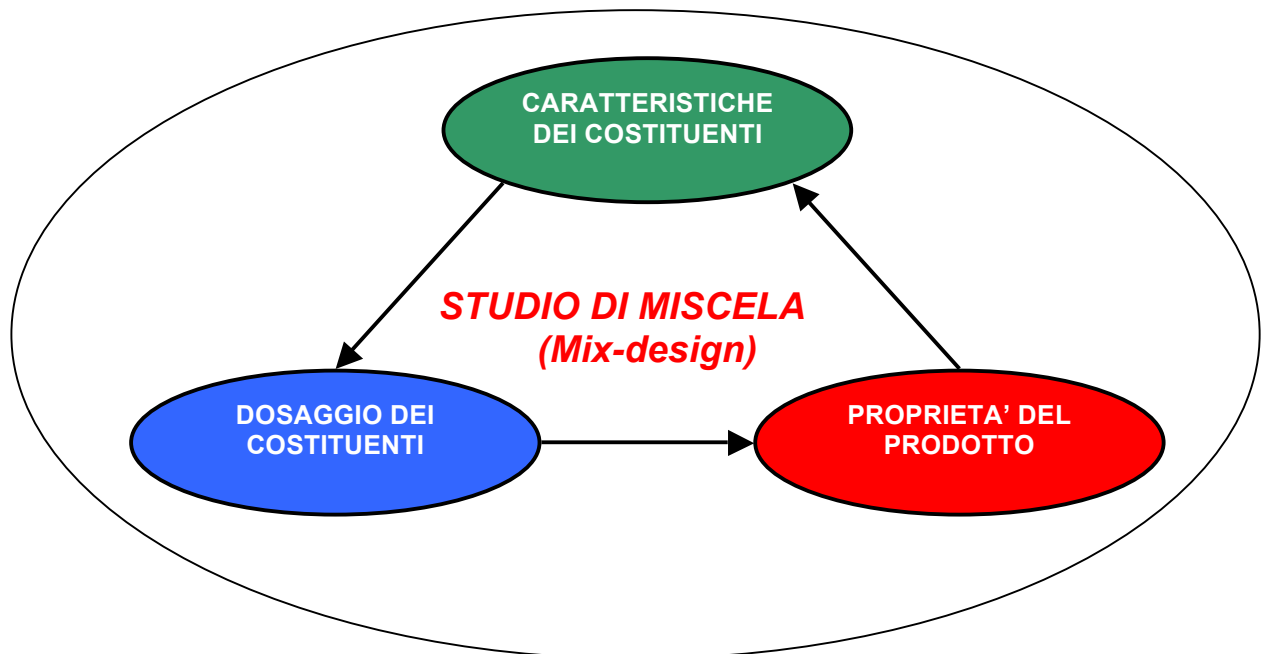
Il Capitolato Speciale d'Appalto rappresenta l'anello di collegamento tra il progetto dell'opera ed il progetto delle miscele poiché in esso vengono identificati i materiali richiesti per la realizzazione dell'opera attraverso opportuni parametri e intervalli di accettazione che sono commisurati alle 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 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 tecnologie necessarie alla composizione del prodotto.

Nella seguente figura sono schematizzate le relazioni reciproche tra lo studio di miscela ed i soggetti responsabili:



Lo studio di miscela si basa sulle correlazioni tra le proprietà dei materiali costituenti, il loro dosaggio e le caratteristiche del prodotto (in produzione e/o in opera) all'interno dell'ambiente (condizioni al contorno) e degli input di progetto.



Come per i materiali con applicazioni strutturali riconosciuti dalle Norme tecniche vigenti (ad esempio: calcestruzzo, acciaio, legno), anche per i materiali impiegati nella costruzione e manutenzione del corpo stradale si possono individuare tre principali proprietà: lavorabilità, resistenza e durabilità. A minime variazioni quantitative e/o qualitative dei costituenti possono generare effetti differenti (migliorativi o peggiorativi) sulle proprietà. Il processo di studio della miscela è basato sulla sperimentazione, sulla verifica dei risultati e conseguente validazione dei materiali e dei procedimenti.

Nell'ambito delle diverse responsabilità assegnate, il Progettista deve definire con precisione le caratteristiche dei materiali e delle lavorazioni, siano di nuova costruzione o di manutenzione dell'esistente, conoscendo le modalità di formulazione di una miscela e di controllo dei materiali e delle lavorazioni. Il Costruttore deve avvalersi di figure professionali competenti (tecnologo dei materiali) in grado di sommare la formazione tecnica specifica sui materiali, alla capacità di eseguire, dirigere ed interpretare prove di laboratorio, alla conoscenza relativa alla posa in opera ed alla cantierizzazione dei materiali stessi, e alla conoscenza del progetto nei suoi lineamenti generali e particolari. Infine, il Responsabile dei controlli in corso d'opera e finali deve conoscere i criteri di base definiti per la caratterizzazione dei materiali e le procedure di formulazione della miscela.

2.1.2 LE APPLICAZIONI DELLO STUDIO DI MISCELA

In generale il concetto di studio della miscela è applicabile in tutti i casi dove i procedimenti di realizzazione prevedono la scelta dei materiali e la loro miscelazione.

Nell'ambito della costruzione e manutenzione dei corpi stradali le categorie di miscele da sottoporre a studio preliminare di formulazione possono essere:

- conglomerati bituminosi;
- miscele per strati profondi (miscele legate e miscele non legate).

Nel caso di impiego diretto di prodotti che non richiedono alcuna miscelazione o di utilizzo dei materiali già presenti in sito la valutazione di conformità è mirata allo studio geotecnico di idoneità (ad esempio: terreni di sottofondo o di rilevato).

Per ogni categoria di materiale esistono uno o più approcci metodologici per lo studio della miscela in funzione della natura del materiale e delle funzioni che esso svolge all'interno della costruzione stradale. Nei paragrafi seguenti sono descritte le principali modalità di esecuzione degli studi di miscela con evidenziate le metodologie e le specifiche peculiarità di applicazione.

2.2 LO STUDIO DI MISCELA DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI

In generale lo studio di miscela applicato ai conglomerati bituminosi è caratterizzato dalle seguenti attività:

- selezione dei materiali costituenti (aggregati grossi, fini, filler, bitume e additivi);
- selezione della composizione granulometrica (curva);
- determinazione del contenuto percentuale di legante;
- verifica delle proprietà volumetriche del materiale alla densità di progetto;
- verifica delle proprietà meccaniche e/o prestazionali del prodotto.

Sulla base degli input della progettazione e del tipo di caratterizzazione dei materiali lo studio di miscela deve essere condotto secondo la metodologia più adeguata e con un appropriato grado di definizione delle proprietà. In particolare è utile correlare la scelta del metodo al Livello di approfondimento (LDA) che il Progettista intende applicare nella definizione dei materiali e nella struttura dei controlli da effettuare per la verifica della conformità contrattuale. Il concetto di Livello di approfondimento è descritto al paragrafo x delle presenti Linee guida.

2.2.1 Studio di miscela e livello di approfondimento

Conformemente alla qualità e quantità dei controlli previsti, il LDA scelto dal Progettista del Capitolato è in grado di condizionare i contenuti dello studio di miscela (mix-design) secondo la seguente suddivisione in base alla tipologia di indagine delle caratteristiche del materiale impiegato:

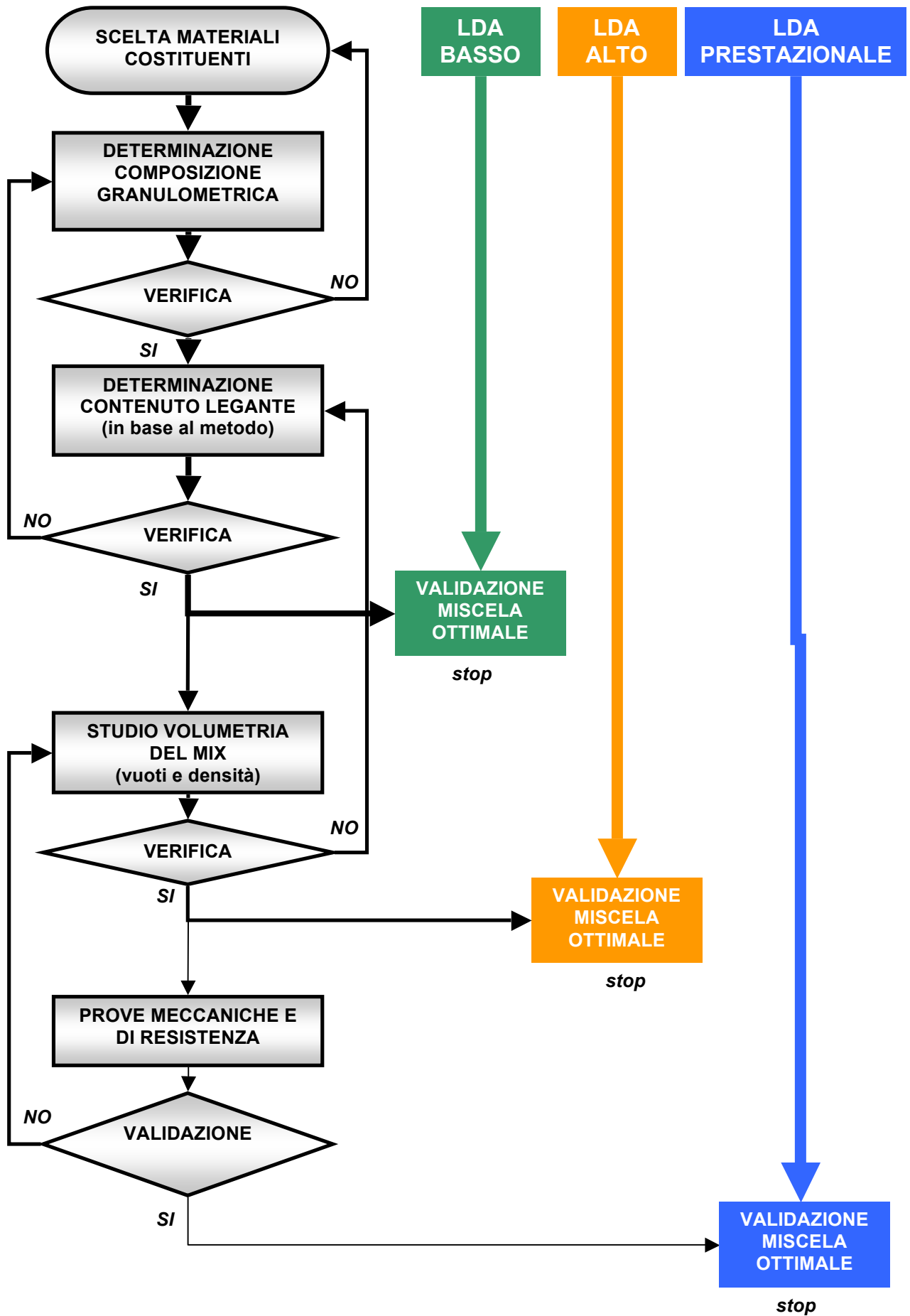
- LDA basso: il CSA ha un profilo puramente prescrittivo e il mix design può essere limitato alla determinazione del contenuto di legante ed alla validazione della curva granulometrica secondo i criteri di accettazione definiti (limiti numerici e tolleranze);
- LDA alto: il CSA riporta prescrizioni relative alla composizione del materiale e a valori prestazionali legati alla sua lavorabilità ed alla sua resistenza. Ne consegue che lo studio della miscela deve dare evidenza del percorso per raggiungere la miscela ottimale, non solo dal punto di vista compositivo, come per il punto precedente (LDA basso), ma anche tenendo in considerazione il contenuto dei vuoti (e quindi la densità) ed i risultati delle prove meccaniche di base;
- LDA prestazionale: il CSA ha caratteristica prestazionale e la ricetta ottimale deve essere determinata in funzione dei risultati delle prove prestazionali.

Nella tabella seguente XX sono esplicitate le correlazioni tra il Livello di approfondimento individuato dal Progettista ed i parametri della miscela:

CARATTERISTICHE DELLA MISCELA DA DETERMINARE CON MIX DESIGN

PARAMETRO	REQUISITO	LIVELLO DI APPROFONDIMENTO (LDA)		
		BASSO	ALTO	PRESTAZIONALE
Caratteristiche compositive				
COMPOSIZIONE	Granulometria miscela	SI	SI	SI *
	Contenuto legante	SI	SI	SI *
VOLUMETRIA	Vuoti residui (VMA / VFB / Vm)	-	SI	SI
	Massa volumica	-	SI	SI
Proprietà dei materiali				
LAVORABILITA' **	Temperatura Curva addensamento	-	SI	SI
RESISTENZA	Stabilità Marshall e/o Res trazione indiretta (ITS) Modulo rigidezza	-	SI	SI
DURABILITA'	Sensibilità all'acqua Res. ormaiamento Res. fatica Res. deformazione	-	-	SI
NOTE:				
* da dichiarare senza vincolo di accettazione nel CSA				
** parametro da determinare solo attraverso approccio volumetrico				

Come anticipato lo studio della miscela è un procedimento che prevede l'insieme di alcune attività analitiche, di verifica e di validazione dei risultati. Il processo è fondato sulla continua sperimentazione finalizzata all'ottenimento dei risultati ottimali riferiti alle caratteristiche compositive ed alle proprietà. Sulla base del livello di approfondimento prescelto lo sviluppo dello studio della miscela è articolato secondo quanto riportato nel seguente diagramma di flusso:



2.2.2 I principali metodi di riferimento

La realizzazione di una miscela bituminosa prevede la calibrazione delle quantità di tutti i materiali componenti, che parte da un'analisi empirica per la selezione degli aggregati e del quantitativo di legante necessario a ricoprire la loro superficie e passa attraverso un processo sperimentale iterativo di prove di laboratorio per convergere alla ricetta ottimale. Se un approccio teorico risulta sufficiente a proporzionare l'assortimento granulometrico per costituire la curva obiettivo, la scelta del quantitativo di legante non può prescindere da uno studio sperimentale in laboratorio che tiene conto del costipamento del materiale e di prove meccaniche per verificarne il comportamento.

Per un capitolato con caratteristica prescrittiva l'accettazione del materiale è subordinata al rispetto dei limiti sugli elementi componenti che sono a garanzia del comportamento meccanico richiesto mentre, per un capitolato prestazionale, il mix design può essere condotto con un maggior grado di libertà sulla composizione della miscela ma è vincolato al raggiungimento della performance.

Le procedure di studio che portano alla definizione di una miscela seguono precisi protocolli che provengono dall'esperienza americana e francese del secolo scorso; tra i tanti, hanno avuto maggior applicazione nel nostro Paese il metodo Marshall ed il più recente metodo volumetrico.

2.2.2.1 Metodo Marshall

Prevede l'impiego di un compattatore *ad impatto* con caratteristiche e funzionamento standardizzato e una pressa che agisce su uno speciale telaio a ganasce per le prove distruttive. Per il progetto della miscela è necessario realizzare una serie di campioni ognuna con un determinato quantitativo di bitume che varia all'interno di un intervallo di valori calcolato con formule empiriche o derivante dall'esperienza. I campioni, che sono compattati in particolari fustelle di forma cilindrica e diametro interno di 101 mm, vengono sottoposti alla prova di schiacciamento diametrale tra le ganasce del telaio dopo immersione in acqua alla temperatura di 60°C; le condizioni e gli standard di prova sono descritti nella UNI EN 12697 -34.

L'individuazione della quantità di bitume ottimale, per miscela chiuse a curva continua è il risultato che rende massima la resistenza della miscela alla prova di schiacciamento diametrale (definita convenzionalmente *stabilità Marshall*) e, al contempo, comporta l'individuazione del valore minimo dei vuoti della miscela dell'aggregato minerale VMA un volume di vuoti nei campioni compattati che si pone in un intervallo variabile -a seconda del materiale- da 2% a 6%. Un altro parametro che si ritiene importante calcolare per ognuna delle prove condotte è la *rigidità Marshall*, che corrisponde al rapporto tra la massima resistenza alla deformazione, la *stabilità Marshall* appunto, e lo *scorrimento* delle ganasce fino alla rottura del provino; la maggior parte dei capitolati in Italia riporta una soglia minima di accettazione anche per la rigidità Marshall.

Risulta difficile fornire una interpretazione univoca del comportamento della miscela e dei risultati della prova Marshall, poiché questi non rappresentano l'effettiva stabilità della miscela in opera, ma sono una misura convenzionale di idoneità all'utilizzo che ha avuto i

suoi fondamenti nella pratica costruttiva con l'uso di bitumi non modificati e senza ausilio di RAP. Nonostante ciò, la semplicità della procedura ne ha diffuso l'impiego in tutto il mondo con l'applicazione anche per i controlli durante la messa in opera.

2.2.2.2 Metodo volumetrico

L'esigenza di fornire un metodo di indagine più accurato per le miscele bituminose ha spinto la ricerca verso un tipo di approccio definito 'volumetrico' che consente di spostare l'obiettivo dell'indagine sulla variazione di volume che interessa il conglomerato bituminoso per gli effetti della realizzazione - stesa e compattazione - e del traffico - deformazione irreversibile sotto carico- fino al momento della sua rimozione dal corpo stradale. A tale scopo, in laboratorio si utilizza un sistema di compattazione che riproduce i vari stadi di addensamento del materiale dall'azione del rullo, all'effetto di ormaiamento del traffico: la pressa giratoria.

Il metodo volumetrico deriva da un più complesso procedimento di mix design americano risultato di un vasto progetto di ricerca (noto come SHRP – Strategic Highway Research Program), che ha conseguito di adattare lo studio delle miscele bituminose in laboratorio alle condizioni del clima ed del traffico, mediante l'ausilio di prove prestazionali accelerate eseguite sul conglomerato bituminoso e sul bitume.

L'apparecchiatura per la compattazione giratoria è caratterizzata da una pressa che svolge un'azione di compressione statica associata, per facilitare l'addensamento del materiale, ad un movimento di rotazione su un piano leggermente inclinato rispetto all'asse verticale lungo il quale si esplica la forza; ad ogni giro aumenta l'energia di compattazione e la densità del conglomerato, che viene monitorata in tempo reale.

Il tracciamento della curva di compattazione mette in relazione la densità del campione con il numero di rotazioni e mostra l'attitudine all'addensamento della miscela bituminosa che dipende dalla struttura degli aggregati scelti con la curva granulometrica e la quantità di legante aggiunto. Oltre alla compattazione di progetto, che corrisponde alla condizione volumetrica del materiale al momento dell'apertura al traffico, è possibile studiare la variazione di densità dovuta all'esercizio dell'infrastruttura fino a fine 'vita utile di progetto'.

La pratica comune suggerisce di valutare 3 istanti del processo di addensamento:

- N_i il numero di giri iniziale: numero di giri, convenzionalmente pari a 10 per tutte le miscele, corrispondenti alla densità del conglomerato bituminoso a fine lavorazione e non deve essere inferiore al 89% della densità massima;
- N_p il numero di giri di progetto: numero di giri, convenzionalmente variabili da 80 a 150 a seconda delle miscele, corrispondenti alla densità del conglomerato bituminoso dopo un certo carico di traffico atteso, valutata in termini di assi standard equivalenti che pari al 96% della densità massima;
- N_{max} il numero di giri massimo: numero di rotazioni, convenzionalmente variabili da 180 a 220 a seconda delle miscele, necessario a riprodurre la densità massima che si desidera ottenere in opera a fine vita utile e non deve essere inferiore al 98% della densità massima.

L'efficacia di questo metodo risiede nella possibilità di valutare le proprietà volumetriche del conglomerato -in termini di volume dei vuoti intergranulari o VMA, volume dei vuoti riempito con bitume o VFB e volume dei vuoti nella miscela compattata- in relazione alla

temperatura e al carico di esercizio, per prevenire fenomeni di instabilità dovuti ad un errata scelta e proporzionamento degli elementi componenti.

2.2.2.3 La scelta del mix design appropriato

I continui miglioramenti tecnologici, le innovazioni sui materiali per applicazioni stradali, la diffusione di leganti bituminosi modificati e il riconoscimento della validità dell'impiego del conglomerato bituminoso fresato nelle miscele, hanno reso l'approccio Marshall per il mix design sempre più distante dalle esperienze applicative da cui esso trae origine, tanto da richiederne una modifica nella procedura di prova nei capitolati – la compattazione dei campioni con il metodo ad impatto, in deroga alle prescrizioni delle norme CNR e UNI EN e per far fronte ai sempre maggiori volumi di traffico, viene condotta con 75 colpi del pestello anziché 50 – ma non una modifica dei requisiti per i risultati meccanici.

I limiti del protocollo di prova Marshall vengono individuati, da un lato, nel tipo di compattazione che non è in grado di simulare con precisione l'addensamento durante la posa in opera vanificando la validità dei risultati volumetrici e, dall'altro, nell'inefficacia della prova di stabilità a fornire una risposta al progettista sul comportamento meccanico del materiale durante il suo periodo di esercizio. A questo si aggiunge lo sviluppo di metodi di dimensionamento delle pavimentazioni basati su caratterizzazioni razionali delle miscele secondo parametri ingegneristici, che non trovano giustificazione nei risultati dello studio Marshall che prevede condizioni di prova estremamente distanti dalle reali sollecitazioni del traffico sul corpo stradale.

Lo studio della miscela secondo il metodo volumetrico, è, invece, in grado di fornire maggiori informazioni sul materiale; ma è bene fare una precisazione. Per come è stato introdotto nei capitolati più evoluti, la caratterizzazione del conglomerato bituminoso si basa sulla valutazione della percentuale di vuoti per ognuno dei 3 livelli di rotazioni ma, contrariamente al metodo Marshall, nella selezione della miscela ottimale non interviene il dato meccanico, che quindi viene prescritto 'a latere' con la prova di trazione indiretta sul campione compattato, idonea a fornire una misura della resistenza alla rottura per trazione del materiale in opera. Il protocollo di prova del metodo volumetrico applicato nel nostro Paese, infatti, non tiene in considerazione le procedure complementari alle attività descritte, che sono invece parte fondamentale del progetto originario americano, quali:

- studio delle proprietà reologiche dei bitumi mediante analisi dinamiche,
- restrizioni alla scelta della curva granulometrica
- prove prestazionali accelerate sul conglomerato bituminoso adattate alle condizioni di progetto.

L'introduzione di un metodo alternativo al metodo Marshall, non accompagnato da una precisa regolamentazione, diventa difficilmente applicabile allorché vengono a mancare quelle prescrizioni necessarie a dare efficacia allo studio. Se la procedura Marshall era minuziosamente descritta nelle norme nazionali del CNR (CNR 30-73), nelle normative UNI EN non v'è spiegazione di come attuare il metodo volumetrico, ma solo delle procedure di prova per la compattazione con pressa girevole (UNI EN 12697-31), per il calcolo dei vuoti e delle densità (UNI EN 12697-5-6-8), e per le prove meccaniche in genere.

Una miscela ottenuta con l'approccio Marshall non necessariamente verifica anche i requisiti del metodo volumetrico in termini vuoti e densità ai numeri di giri ritenuti convenzionalmente fissati, ma, con grande probabilità, deve subire una revisione a partire dalla selezione degli aggregati e del tipo di bitume.

Nei CSA pionieri del metodo volumetrico degli ultimi anni, sono state introdotte le prescrizioni sui vuoti per i 3 istanti di addensamento con la pressa giratoria (tabella x), che sono stati presi a riferimento, in maniera semplicistica, anche da altri capitolati, indipendentemente dal tipo di conglomerato bituminoso e dalla sua applicazione.

Ni	10 giri	vuoti >11%
Nprog	100 giri	vuoti 3%-6%
Nmax	180 giri	vuoti >2%

Tabella x

Tuttavia, la scelta di introdurre il metodo volumetrico, senza una precisa descrizione della procedura e senza la spiegazione di concetti legati alla volumetria quali VMA, VFB e densità massima della miscela (i cui metodi di prova non sono mai stati introdotti nelle norme nazionali CNR in uso), ha causato grandi difficoltà operative e rischia di insinuare dubbi sulla sua validità.

L'esistenza di conglomerati bituminosi con buone caratteristiche meccaniche nonostante la non rispondenza dei vuoti al numero di giri fissato, suggerisce la necessità di considerare variabili tali valori e di introdurre studi più approfonditi secondo le prescrizioni del metodo SHRP.

2.2.3 I contenuti dello studio di miscela

Lo studio del materiale deve fornire evidenza del processo che ha condotto alla scelta della miscela ottimale. Una volta fissata la curva granulometrica vengono prodotte diverse miscele corrispondenti ad apporti crescenti in termini percentuali di legante e, sulla base del criterio di selezione, si individua quello che risponde ai requisiti del CSA.

Il parametro che determina la scelta del mix ottimale è il contenuto percentuale dei vuoti. Le proprietà meccaniche di un conglomerato bituminoso compattato dipendono fortemente dalla percentuale di vuoti residui interni in quanto un elevato volume di vuoti comporta una maggior attitudine del materiale a deformarsi ed una minor resistenza alle azioni di carico. Una delle principali informazioni che lo studio di formulazione del mix deve fornire è la densità post-compattazione e il conseguente contenuto di vuoti. Le prove che caratterizzano il comportamento meccanico del materiale dovranno essere condotte sul campione corrispondente alla densità ottimale.

Nella seguente tabella sono riportati i requisiti che, in linea generale, è bene considerare nella progettazione di un conglomerato bituminoso:

MATERIALE	REQUISITI ESSENZIALI			EVIDENZE DOCUMENTALI
	per la posa	per la compattazione	per le prestazioni	
BITUME	Viscosità	Viscosità	Caratteristiche meccaniche empiriche (se richieste) Caratteristiche meccaniche fondamentali (se richieste) Comportamento all'invecchiamento Stabilità allo stoccaggio	Origine Marchio CE norme di riferimento per le prove di laboratorio
AGGREGATI (filler - fini - grossi)	-	Caratteristiche intrinseche Curva granulometrica	Caratteristiche meccaniche	Origine Marchio CE norme di riferimento per le prove di laboratorio
MISCELA BITUMINOSA	Temperatura in produzione ed alla stesa	T° min di compattazione Caratteristiche volumetriche: densità, vuoti, VMA e VFB	Caratteristiche meccaniche empiriche (se richieste) Caratteristiche meccaniche prestazionali (se richieste) Descrizione metodo e composizione del mix Caratteristiche volumetriche: densità, vuoti, VMA e VFB	Marchio CE norme di riferimento per le prove di laboratorio

2.2.4 Relazione tra studio di miscela e controlli sul prodotto

In linea generale, l'accertamento dell'idoneità di un conglomerato bituminoso da parte dell'ente di controllo, avviene in corso d'opera o, preventivamente alla stesa, attraverso un'attività di *qualifica* del prodotto presso l'impianto di produzione, riproducendo le prove compositive e meccaniche prescritte in capitolato; per riprodurre i campioni necessari alla verifica, deve essere impiegato lo stesso metodo di compattazione e produzione dei campioni scelto per il progetto della miscela (Marshall o volumetrico).

Per verificare la densità in opera, invece, il controllo avviene sulle carote estratte sulle quali si calcolano le masse volumiche oppure, in casi più rari, può essere richiesto anche lo stesso contenuto percentuale di vuoti, che però impegna un processo di elaborazione più lungo e più complicato. Le informazioni derivanti dalle prove sia dello sciolto, sia delle carote, vengono correlate.

La scelta dei metodi di compattazione di laboratorio per lo studio della miscela ottimale, non può inficiare il risultato finale che, altresì, deve corrispondere, con un minimo margine di tolleranza, al grado di compattazione in opera.

Un'errata scelta di livello di compattazione nella fase di mix design, infatti, potrebbe comportare errori di valutazione nella scelta della curva granulometrica e del legante aggiunto e produrre un comportamento meccanico inatteso del materiale nella fase di esercizio.

In relazione ai modelli di studio descritti, per individuare in modo corretto i parametri che vengono presi a riferimento nel processo di controllo, si ritiene necessario che nel mix design siano precisati:

- il criterio con il quale determinare la densità del conglomerato bituminoso: è opportuno riportare il riferimento normativo e la parte di norma attraverso il quale si intende procedere per il calcolo. Tale parametro è fondamentale nella definizione del volume di vuoti nel campione compattato
- l'energia di compattazione necessaria a produrre i provini; per il metodo Marshall la normativa di riferimento suggerisce di applicare 50 colpi per faccia ma, per una consolidata pratica comune, questo numero è stato spostato a 75 per tutti i materiali eccezion fatta per i conglomerati bituminosi per strati drenanti. Per il metodo volumetrico è necessario specificare il numero di giri iniziale N_i , di progetto N_p e quello massimo N_{max} facendo attenzione che, i valori introdotti per i conglomerati bituminosi americani (10, 100 e 180), potrebbero non risultare idonei alle esigenze del progetto (vedasi nota siteb).
- La densità di riferimento alla quale effettuare la caratterizzazione meccanica del materiale: il comportamento del conglomerato bituminoso varia al variare della percentuale di vuoti interni ed le prove meccaniche e simulate dell'azione del traffico devono corrispondere ad un preciso istante di addensamento per poter essere confrontabili con i dati progettuali;
- il riferimento normativo al quale sono condotte le prove di laboratorio: la caratterizzazione di alcune grandezze fisiche e meccaniche può essere ottenuta con differenti configurazioni di prova, molte delle quali appartenenti alla stessa normativa, ma con risultati molto diversi tra loro.

LO STUDIO DELLE MISCELE NEGLI STRATI PROFONDI

Lo studio della miscela, per definizione, non è applicabile ai materiali impiegati nel corpo stradale nel caso in cui non siano sottoposti a processi di miscelazione con altri prodotti che comportano la variazione delle proprietà finali dell'elemento costruttivo.

In generale per i materiali utilizzati nella realizzazione degli strati profondi le valutazioni necessarie sono riconducibili alla verifica della portanza e del comportamento nelle specifiche condizioni climatiche e di carico.

Nella realizzazione degli strati profondi, collocati al di sotto della pavimentazione, il Progettista può intervenire secondo le seguenti modalità principali:

- mantenere il materiale esistente sovrapponendo gli strati superiori della sovrastruttura (fondazione e pavimentazione);
- modificare in situ i materiali esistenti (procedimenti di stabilizzazione);
- sostituire o riportare altri materiali (misti non legati o legati).

La scelta del tipo di intervento è basata sulla conoscenza approfondita dei materiali attraverso indagini dirette in situ e prove condotte in laboratorio che consentono la determinazione delle singole caratteristiche e la valutazione di insieme delle proprietà geotecniche. La conoscenza delle proprietà fisiche dei materiali consente di determinare le condizioni ottimali di stesa e compattazione in relazione al comportamento nelle diverse condizioni di umidità.

Lo studio dei materiali impiegati negli strati sottostanti la pavimentazione si compone essenzialmente di due fasi:

- caratterizzazione dei materiali disponibili;
- studio della miscela (mix-design).

La caratterizzazione dei materiali è sempre necessaria e, generalmente, si basa sull'accertamento delle seguenti caratteristiche:

- Classificazione del materiale;
- Limiti di Atterberg;
- Studio Proctor;
- Contenuto di acqua;
- Indice di portanza CBR.

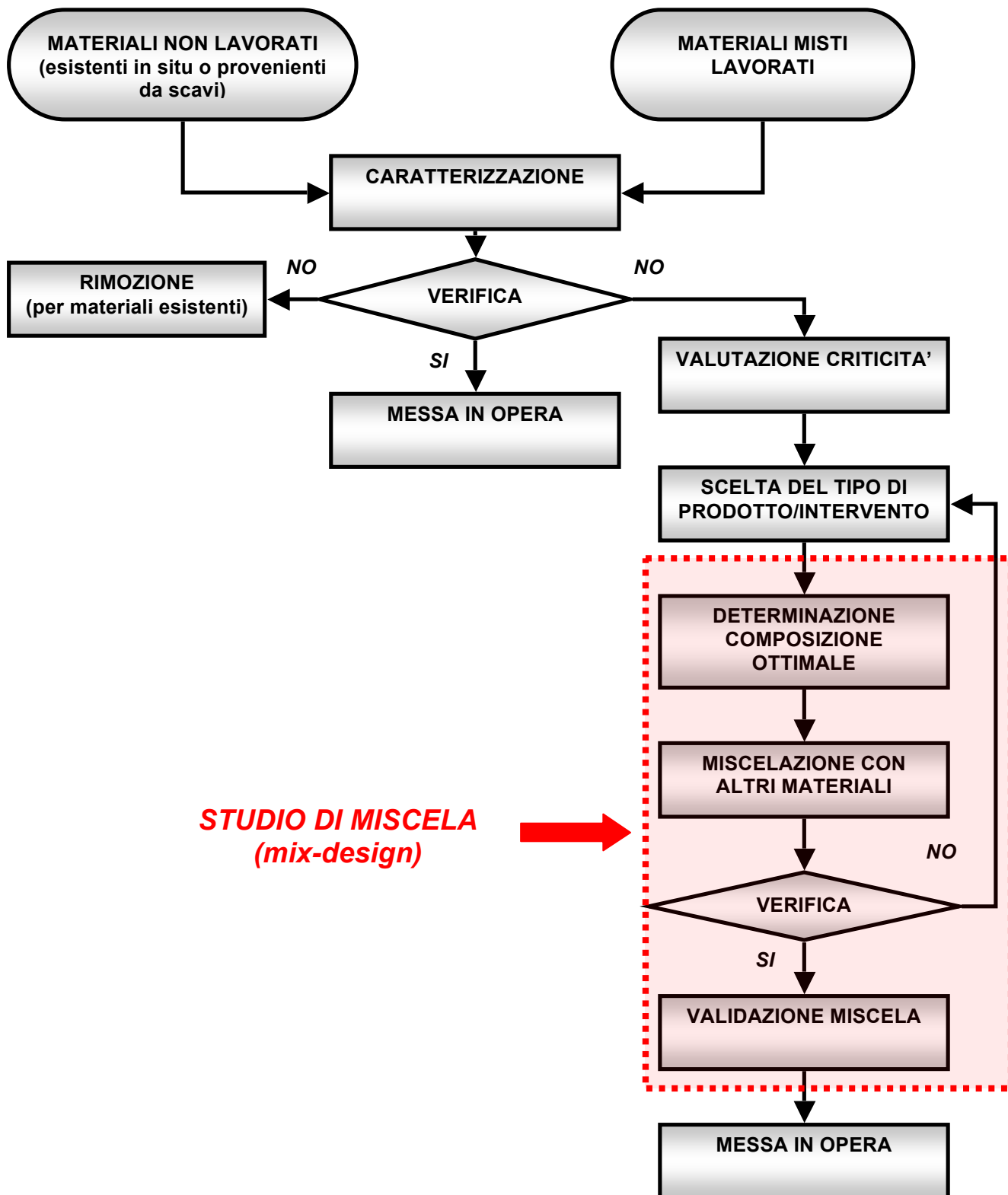
È bene precisare che le metodologie più diffuse per la classificazione dei materiali, a livello internazionale, sono la H.R.B (Highway Research Board) e la U.S.C.S (Unified Soil Classification System). La celebre norma UNI 10006 recepiva tali metodologie nello Stato italiano, tuttavia, come noto, è stata sostituita dalle tre norme di derivazione comunitaria di seguito elencate:

- UNI EN ISO 14688 (parte 1) stabilisce i principi generali per l'identificazione e la classificazione delle terre naturali in sito e delle terre movimentate e indica i criteri di raggruppamento in classi;

- UNI EN 13242 che specifica le proprietà degli aggregati ottenuti mediante trattamento di materiali naturali o riciclati o artificiali da utilizzare come prodotti non legati o legati. Fornisce i criteri di classificazione del materiale secondo le caratteristiche geometriche, fisiche e chimiche ed è il riferimento per gli adempimenti obbligatori in materia di marcatura CE;
- UNI EN 13285 precisa la composizione delle miscele (fusi granulometrici) in base al diametro massimo.

Lo studio della miscela (mix design), invece, è necessario nel caso in cui si debba procedere con la modifica del materiale mediante miscelazione con altro materiale e/o aggiunta di legante. Numerose sono le tipologie di prodotti disponibili e le soluzioni tecnologiche di produzione in situ o in impianto di lavorazione pertanto il Progettista deve conoscere a fondo le proprietà dei materiali per attuare la scelta più idonea per soddisfare le esigenze definite.

Nella figura seguente è schematizzato il flusso delle attività relative al processo di studio dei materiali impiegati per la realizzazione degli strati posizionati sotto la pavimentazione.



Nei paragrafi seguenti sono sviluppati i concetti correlati con la caratterizzazione dei materiali e con i contenuti degli studi di miscela.

2.2.5 TERRENI NATURALI

Nella caratterizzazione geotecnica del materiale deve essere posta particolare attenzione alle caratteristiche geometriche (granulometria), ai limiti di Atterberg ed all'indice di portanza CBR.

La classificazione consente già di dare un giudizio di idoneità in caso di materiali a grana grossa non plastici o poco plastici. Per i materiali a grana fine vanno valutati i risultati dei limiti di Atterberg e la determinazione del contenuto in sostanza organica. Le torbe o le argille torbose devono essere scartate dalla possibilità d'uso e deve essere indicata la loro rimozione e sostituzione.

Per buona parte dei materiali devono essere accertati:

- il contenuto naturale d'acqua,
- la densità secca massima e l'ottimale d'acqua (Studio Proctor – si usa generalmente la prova Proctor modificata),
- l'indice di portanza CBR (Californian Bearing Ratio), valutato al contenuto d'acqua ottimale e a contenuti d'acqua inferiori e superiori di alcuni punti percentuali (solitamente 2 o 3 e a seconda dell'andamento della curva a campana ottenuta dalla prova Proctor) rispetto all'umidità ottimale.

In base alle risultanze deve essere data l'indicazione di:

- usare il materiale tal quale;
- stabilizzare i materiali con tecniche in sito (§ x);
- procedere alla loro sostituzione con materiali più idonei.

In alternativa allo studio completo in laboratorio sul materiale, una volta definita la classificazione e il contenuto naturale d'acqua, si può procedere alla verifica in campo delle condizioni di portanza con prova di carico. Nel caso di esiti negativi (portanza insufficiente), si passa al completamento dello studio in laboratorio in funzione della possibilità di agire con interventi appropriati (rimozioni, stabilizzazioni granulometriche, stabilizzazione a legante, ecc).

Limitatamente al caso in cui si verifichino situazioni macroscopicamente evidenti di materiali geotecnicamente eccellenti a grana grossa, tipo ghiaie grossolane con frazione fine non plastica, è possibile verificare direttamente le condizioni di portanza con prove in sito; tale decisione va chiaramente affidata solo ed esclusivamente a tecnici con indiscussa esperienza e preparazione.

2.2.6 STRATO ANTICAPILLARE

E' uno strato cosiddetto accessorio, che si colloca alla base della costruzione del corpo stradale al di sopra del terreno naturale. La sua funzione è quella di impedire la risalita capillare e/o di garantire una permeabilità elevata come forma di protezione idraulica (in

pratica il rilevato può essere attraversato dall'acqua alla sua base, oppure raccogliere acque espulse in profondità quando si applicano tecniche di consolidamento ad esempio pali in sabbia)

Si impiegano aggregati prodotti in conformità alla norma UNI EN 13242 con di pezzatura ben definita, in genere 20-80 mm.

La caratterizzazione dei materiali comprende principalmente la verifica delle seguenti caratteristiche:

- mineralogia e petrografia finalizzate all'esclusione di materiali contenenti argille, marne o minerali degradabili o gelivi;
- resistenza alla frantumazione (Los Angeles con categoria di soglia consigliata LA₃₀);
- composizione granulometrica con particolare attenzione alla frazione fine (generalmente si valuta la dimensione massima dell'aggregato, D max = 80 o altro definito; solitamente passante a 20 mm < 20%; passante a 2mm < 10; passante a 0,063 < 2 %).

Qualora l'aggregato sottoposto a caratterizzazione non possieda i requisiti richiesti si può procedere con miscelazione di più aggregati, ciascuno di essi deve soddisfare le prime due condizioni, mentre l'aggregato finale sarà determinato unicamente mediante studio di composizione granulometrica.

2.2.7 STRATI GENERICI DEL RILEVATO

I materiali impiegati nella realizzazione dei rilevati possono avere origine differente (materiali naturali, prodotti riciclati ottenuti dal trattamento dei rifiuti, prodotti industriali).

Per ogni materiale lo studio deve prevedere, in sequenza:

- la caratterizzazione geotecnica del materiale deve essere posta particolare attenzione alle caratteristiche geometriche (granulometria), ai limiti di Atterberg ed all'indice di portanza CBR;
- la classificazione consente già di dare un giudizio di idoneità in caso di materiali a grana grossa non plastici o poco plastici. Per i materiali a grana fine vanno valutati i risultati dei limiti di Atterberg e la determinazione del contenuto in sostanza organica. Le torbe o le argille torbose devono essere scartate dalla possibilità d'uso e deve essere indicata la loro rimozione e sostituzione;
- la determinazione del contenuto naturale d'acqua;
- lo studio Proctor (modificato) con determinazione della densità secca massima e dell'ottimale d'acqua;
- la determinazione dell'indice di portanza CBR (Californian Bearing Ratio), valutato al contenuto d'acqua ottimale e a contenuti d'acqua inferiori e superiori di alcuni punti percentuali (solitamente 2 o 3 e a seconda dell'andamento della curva a campana ottenuta dalla prova Proctor) rispetto all'umidità ottimale; in base a queste risultanze deve essere valutata la possibilità di usare il materiale tal quale o stabilizzarlo o di procedere alla sua sostituzione con materiali più idonei.

Per i materiali riciclati provenienti dal trattamento dei rifiuti o da attività industriali lo studio prevede, in aggiunta:

- la determinazione delle caratteristiche ambientali, con particolare riferimento alle prove di eluato per la verifica di potenziali rilasci nocivi;

Per alcuni materiali riciclati o di origine industriale (sottoprodotti), oltre agli aspetti ambientali, è opportuno effettuare:

- l'analisi chimica;
- l'analisi mineralogica per rifrattometria;
- la determinazione del rigonfiamento a 7 giorni su fustelle CBR immerse almeno 4 giorni in acqua e la ripetizione della determinazione alla stessa scadenza dell'indice di portanza CBR; in casi di dubbio tale ultima fase può essere ripetuta a scadenze più prolungate (28 gg; 60 gg, 90 gg);
- in caso di permanenza di dubbi ulteriori è preferibile l'esecuzione di una sperimentazione in sito con l'esecuzione di un campo prove con particolare riguardo a verificare l'insorgenza di fenomeni espansivi.

Nel caso si effettui una miscela dei materiali lo studio deve comprendere la classificazione indipendente di ogni componente, la formulazione della miscela ottimale e la verifica dei parametri secondo la sequenza indicata. E' bene ricordare che, dal punto di vista ambientale, nell'attività di costruzione stradale, la miscelazione è consentita a partire da materiali che già sono classificabili come materiali utilizzabili e non è ammesso l'utilizzo di materiali non utilizzabili (rifiuti) al di sotto delle soglie ammesse.

Nel caso di esecuzione di rilevati alleggeriti, i materiali sono di origine industriale e soggiacciono alla specifica norma UNI EN 13055-1 ed in questo si esegue la valutazione e la verifica delle proprietà richieste, spesso desumibili dalle sole indicazioni di marcatura. Data la funzionalità specifica va valutata soprattutto l'idoneità dei valori di massa volumica.

2.2.8 TERRE STABILIZZATE A CALCE

La stabilizzazione a calce è una tecnica realizzata in situ applicabile a terreni argillosi di grana fine. Il principio di base è la miscelazione della terra con calce in forma di ossido (l'uso dell'idrossido è molto meno efficace ed è in pratica abbandonato) così da modificare il comportamento meccanico della miscela rendendola stabile nel tempo.

Con tale applicazione è necessario che l'analisi comprenda la caratterizzazione del materiale ed anche lo studio della miscela (mix-design). Lo studio completo comprende le seguenti fasi:

- caratterizzazione geotecnica del materiale; i riferimenti sono le classificazioni geotecniche di riferimento. Generalmente si ammette la possibilità di trattare a calce le terre argillose a grana fine, ma anche terre ghiaioso argillose (passante granulometrico a 0,4 mm non inferiore al 35 %). La determinazione dei limiti di Atterberg diventa la discriminante fondamentale: in genere si ammette la possibilità

che una terra argillosa sia potenzialmente stabilizzabile a calce quando l'indice di plasticità I_p è maggiore di 10;

- determinazione del contenuto di sostanze organiche (soglia solitamente ammessa inferiore al 4%), del contenuto di solfati e del contenuto di nitrati;
- individuazione della calce da utilizzare e definizione delle sue caratteristiche con particolare riferimento alla reattività, al contenuto totale di ossidi di calcio e magnesio, ai limiti granulometrici;
- determinazione del C.I.C. (consumo iniziale di calce) che rappresenta un tecnica di individuazione del contenuto minimo di calce che si dovrà utilizzare sulla base della misura del pH della miscela, terra – calce (dosaggi progressivi di calce fino ad ottenere un PH minimo di 12,5);
- preparazione di campioni della miscela con contenuti differenti di calce (minimo tre campioni);
- analisi di laboratorio da effettuare su ogni campione:
 - determinazione dei limiti di Atterberg,
 - studio Proctor (modificato) con determinazione della densità secca massima e dell'ottimale d'acqua,
 - determinazione dell'indice di portanza CBR (Californian Bearing Ratio), valutato al subito il costipamento,
 - determinazione dell'indice di portanza CBR (Californian Bearing Ratio), valutato a 7gg con maturazione in aria e a 7 gg con maturazione di almeno 4 gg con provini sommersi in acqua,
 - determinazione del rigonfiamento lineare,
 - determinazione della resistenza a compressione su provini CBR con espansione laterale libera su provini maturati a 7gg in aria e a 7giorni di cui 4gg sommersi in acqua,
 - determinazione della resistenza a trazione su provini CBR con espansione laterale libera su provini maturati a 7gg in aria e a 7giorni di cui 4gg sommersi in acqua,
 - lo studio potrebbe essere completato con la ripetizione della determinazione dell'indice di portanza CBR, della resistenza a compressione e della resistenza a trazione a 28 gg di maturazione.
- Valutazione dei risultati ottenuti e determinazione del contenuto ottimale di calce.
- Predisposizione di un campo prove (auspicabile);
- Verifica dei risultati;
- Validazione della miscela.

2.2.9 TERRE STABILIZZATE A CEMENTO

La stabilizzazione a cemento è una tecnica realizzata in situ applicabile a terreni non argillosi di grana fine ed anche grossa. Il principio di base è la miscelazione della terra con cemento (solitamente 32,5) così da permettere il formarsi di legami dati dall'idratazione del cemento che modificano il comportamento meccanico sia a breve che a lungo termine della miscela rispetto alla terra da trattare.

Con tale applicazione è necessario che l'analisi comprenda la caratterizzazione del materiale ed anche lo studio della miscela (mix-design). Lo studio completo comprende le seguenti fasi:

- caratterizzazione geotecnica del materiale; i riferimenti sono le classificazioni geotecniche di riferimento. La determinazione dei limiti di Atterberg diventa la discriminante fondamentale: in genere si ammette la possibilità che una terra argillosa sia potenzialmente stabilizzabile a calce quando l'indice di plasticità I_p è uguale a 0, ossia non sono presenti minerali argillosi e plastici;
- determinazione del contenuto di sostanze organiche (soglia solitamente ammessa inferiore al 4%), del contenuto di solfati e del contenuto di nitrati;
- individuazione del cemento da utilizzare (standard di riferimento: cemento 32,5 provvisto di marcatura CE secondo la UNI EN 197-1);
- preparazione di campioni della miscela con contenuti differenti di cemento (minimo tre campioni);
- analisi di laboratorio da effettuare su ogni campione:
 - studio Proctor (modificato) con determinazione della densità secca massima e dell'ottimale d'acqua,
 - determinazione dell'indice di portanza CBR (Californian Bearing Ratio), valutato subito dopo il costipamento,
 - determinazione dell'indice di portanza CBR (Californian Bearing Ratio), valutato a 7gg con maturazione in aria e a 7 gg in ambiente a umidità relativa superiore al 90%,
 - determinazione della resistenza a compressione su provini CBR con espansione laterale libera su provini maturati a 7gg in ambiente a umidità relativa superiore al 90%,
 - determinazione della resistenza a trazione su provini CBR con espansione laterale libera su provini maturati a 7gg in ambiente a umidità relativa superiore al 90%,
 - lo studio potrebbe essere completato con la ripetizione della determinazione dell'indice di portanza CBR, della resistenza a compressione e della resistenza a trazione a 28 gg di maturazione. In questo caso il dato è molto significativo perché consente l'analisi dei risultati a reazioni di idratazione completate.
- Valutazione dei risultati ottenuti e determinazione del contenuto ottimale di cemento;
- Predisposizione di un campo prove (auspicabile);
- Verifica dei risultati;
- Validazione della miscela.

2.2.10 TERRE STABILIZZATE A CALCE E CEMENTO

La stabilizzazione a calce e cemento è una tecnica realizzata in situ applicata a terre fini, ma non solo, poco plastiche e quindi poco argillose. Il principio è quello di miscelare finemente la terra prima a calce, per renderla non plastica e poi, terminate le reazioni della calce proseguire stabilizzando a cemento.

Con tale applicazione è necessario che l'analisi comprenda la caratterizzazione del materiale ed anche lo studio della miscela (mix-design). Lo studio completo comprende le seguenti fasi:

- caratterizzazione geotecnica del materiale; i riferimenti sono le classificazioni geotecniche di riferimento. La determinazione dei limiti di Atterberg è fondamentale; in genere la stabilizzazione mista è ammessa quando l'indice di plasticità è compreso tra 0 e 10;
- determinazione del contenuto di sostanze organiche (soglia solitamente ammessa inferiore al 4%), del contenuto di solfati e del contenuto di nitrati;
- individuazione della calce e del cemento secondo quanto definito per le singole stabilizzazioni;
- preparazione di campioni della miscela con contenuti differenti di cemento (minimo tre campioni);
- determinazione del C.I.C. (consumo iniziale di calce) e lasciandola reagire per almeno 24 ore ed eventualmente verificando l'efficacia determinando nuovamente i limiti di Atterberg (dovrebbe risultare IP intorno a 0);
- preparazione di campioni della miscela con contenuti differenti di calce (minimo tre campioni);
- analisi di laboratorio da effettuare su ogni campione:
 - studio Proctor (modificato) con determinazione della densità secca massima e dell'ottimale d'acqua,
 - determinazione dell'indice di portanza CBR (California Bearing Ratio), valutato subito dopo il costipamento,
 - determinazione dell'indice di portanza CBR (California Bearing Ratio), valutato a 7gg con maturazione in aria e a 7 gg con maturazione di almeno 4 gg con provini sommersi in acqua,
 - determinazione della resistenza a compressione su provini CBR con espansione laterale libera su provini maturati a 7gg in ambiente a umidità relativa superiore al 90%,
 - determinazione della resistenza a trazione su provini CBR con espansione laterale libera su provini maturati a 7gg in ambiente a umidità relativa superiore al 90%,
 - lo studio potrebbe essere completato con la ripetizione della determinazione dell'indice di portanza CBR, della resistenza a compressione e della resistenza a trazione a 28 gg di maturazione. In questo caso il dato è molto significativo perché consente l'analisi dei risultati a reazioni di idratazione completate.
- Valutazione dei risultati ottenuti e determinazione del contenuto ottimale di calce e cemento;
- Predisposizione di un campo prove (auspicabile);
- Verifica dei risultati;
- Validazione della miscela.

2.2.11 FONDAZIONE STRADALE IN MISTO STABILIZZATO GRANULOMETRICAMENTE

Il materiale impiegato è un misto granulare non legato caratteristico delle sovrastrutture flessibili e caratterizzato secondo la UNI EN 13242.

L'analisi del materiale comprende la caratterizzazione e lo studio della miscela che consiste nella definizione di una composizione granulometrica, con diametro massimo generalmente di 32,5 mm, andamento continuo e progressivo della curva per assicurare la presenza di elementi grossi (scheletro) e fini di intasamento dei vuoti interstiziali.

E' prassi consolidata definire un fuso di riferimento al quale riferire la curva granulometrica e porre dei parametri di soglia per altre grandezze caratteristiche.

Lo studio della miscela completo comprende le seguenti fasi:

- valutazione delle proprietà fisiche dell'aggregato o della miscela di aggregati in relazione alla composizione petrografica – mineralogica scartando i materiali contenenti elementi degradabili o gelivi;
- determinazione della resistenza alla frantumazione (Los Angeles con categoria di soglia consigliata LA₃₀);
- verificare i coefficienti di forma e appiattimento della frazione grossa; materiali con eccessiva presenza di elementi allungati o piatti andrebbero scartati, valutare se il materiale è composto da elementi poliedrici o tondeggianti;
- valutare la frazione fine per verificare se la frazione passante al setaccio 0,063 ha indice di plasticità nullo (esecuzione dei Limiti di Atterberg), controllo che può essere omesso se è accertata la provenienza da frantumazione di roccia avente composizione idonea;
- controllare la composizione granulometrica per cui risulti una curva continua e gradata eventualmente inserita nel fuso di riferimento definito come indicazione e non come prescrizione;
- controllare la sufficiente presenza di materiali fini in grado di creare un addensamento appropriato del materiale, per questo si valuta il passante al setaccio 0,063: i materiali idonei in linea di massima hanno valori tra il 5 ed il 15% di passante;
- determinare il contenuto naturale d'acqua;
- effettuare lo studio Proctor Modificato con la determinazione della densità secca massima e dell'ottimale d'acqua;
- determinare l'indice di portanza CBR (Californian Bearing Ratio), valutato al contenuto d'acqua ottimale e a contenuti d'acqua inferiori e superiori di 2 punti rispetto all'umidità ottimale, i valori di CBR generalmente vanno valutati su un valore di soglia predefinito ad esempio CBR = 60.
- - determinare l'indice di portanza CBR (Californian Bearing Ratio), su provini imbibiti per 4 gg e valutare il rapporto con le condizioni di non saturazione.

Per alcuni materiali riciclati o di origine industriale (sottoprodotti), oltre agli aspetti ambientali, è opportuno effettuare:

- l'analisi del processo di produzione;
- l'analisi chimica;
- l'analisi mineralogica per rifrattometria;

- la verifica del contenuto di materiale proveniente dalle demolizioni (es. cb fresato, laterizio, calcestruzzo, ..) ed il contenuto di impurità (es. vetro, legno, ...);
- la determinazione del rigonfiamento a 7 giorni su fustelle CBR immerse almeno 4 giorni in acqua e la ripetizione della determinazione alla stessa scadenza dell'indice di portanza CBR; in casi di dubbio tale ultima fase può essere ripetuta a scadenze più prolungate (28 gg; 60 gg, 90 gg);
- in caso di permanenza di dubbi ulteriori è preferibile l'esecuzione di una sperimentazione in sito con l'esecuzione di un campo prove con particolare riguardo a verificare l'insorgenza di fenomeni espansivi.

2.2.12 FONDAZIONE STRADALE IN MISTO CEMENTATO

Il misto cementato costituisce la fondazione stradale classica delle fondazioni semirigide: è ottenuto dalla miscelazione di un misto granulare con cemento a dosaggio controllato ed acqua.

Lo studio della miscela completo comprende le seguenti fasi:

- determinazioni delle caratteristiche degli aggregati; valgono in generale le stesse considerazioni di idoneità del misto granulare, con le seguenti differenze:
 - sulla parte fine dell'aggregato devono essere effettuate ulteriori verifiche per accertare l'assenza di elementi finissimi nocivi alla reazione di idratazione del cemento (ad esempio la determinazione dell'equivalente in sabbia a cui si dà un valore di soglia di solito uguale a 30);
 - il campo di variazione del passante al setaccio 0,063 è più ristretto (comunemente si indicano valori compresi fra 2% e 10%);
 - nella composizione granulometrica si tende ad inserire una frazione minima di aggregato grosso ad elementi a forma poliedrica (aggregato di frantumazione) pari al 30 %;
 - la continuità della curva granulometrica è definita con maggiore precisione ed il fuso di riferimento è più stretto.
- individuazione del cemento da utilizzare (standard di riferimento: cemento 32,5 provvisto di marcatura CE secondo la UNI EN 197-1);
- preparazione di campioni della miscela con contenuti differenti di calce (minimo tre campioni);
- analisi di laboratorio da effettuare su ogni campione:
 - studio Proctor (modificato) con determinazione della densità secca massima e dell'ottimale d'acqua,
 - determinazione dell'indice di portanza CBR (Californian Bearing Ratio), valutato subito dopo il costipamento,
 - determinazione della resistenza a compressione su provini CBR con espansione laterale libera su provini maturati a 7gg in ambiente saturo,
 - determinazione della resistenza a trazione su provini CBR con espansione laterale libera su provini maturati a 7gg in ambiente saturo,
 - lo studio potrebbe essere completato con la ripetizione della determinazione dell'indice di portanza CBR, della resistenza a compressione e della resistenza a trazione a 28 gg di maturazione. In questo caso il dato è molto significativo perché consente l'analisi dei risultati a reazioni di idratazione completate.

- Valutazione dei risultati ottenuti e determinazione del contenuto ottimale di cemento. Nella scelta della percentuale di cemento si deve tener conto che le caratteristiche di resistenza non devono portare né a valori troppo bassi né a valori troppo elevati, perché si indurrebbe un comportamento troppo rigido del materiale in opera. E' prassi indicare l'intervallo di accettazione di resistenza a compressione R_c a 7 gg compreso tra 2,5 e 6,0 MPa. Alcune funzionalità specifiche dello strato possono portare ad indicare range di accettazione diversi.