Università degli Studi di Messina
Dipartimento di Ingegneria

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA E CHIMICA DEI MATERIALI E DELLE COSTRUZIONI - XXXI CICLO

Proposta di un modello mesostrutturale per l'analisi dei meccanismi di rottura delle miscele bituminose delle sovrastrutture stradali flessibili

---

Dottorando:

Dott. Ing. FEDERICO CARBONE

Tutor:

Chiar.mo Prof. GIUSEPPE RICCIARDI

Co-tutor:

Chiar.mo Prof. GAETANO BOSURGI

Anno Accademico 2017-2018

Sommario

1 Introduzione 1
2 Modellazione e progettazione delle sovrastrutture stradali .. 5
2.1 Brevi cenni storici 6
2.2 Prestazioni richieste alla sovrastruttura 7
2.3 Il sistema multistrato 16
2.4 Le azioni del traffico 18
2.5 Azioni ambientali 20
2.6 La progettazione della sovrastruttura 23
2.7 La manutenzione della sovrastruttura 24
3 Caratterizzazione del conglomerato bituminoso 27
3.1 Proprietà fisiche e meccaniche degli aggregati 27
3.1.1 Proprietà di accettazione 32
3.1.2 Proprietà di provenienza 38
3.1.3 Granulometria 40
3.2 Comportamento fisico e meccanico del legante 44
3.3 Proprietà fisiche e meccaniche del c.b. 47
3.3.1 Le proprietà volumetriche della miscela 48
3.3.2 Le proprietà meccaniche della miscela 50
3.4 Il progetto della miscela 55
3.4.1 Metodo Marshall 58
3.4.2 Metodo HVEEM 63
3.4.3 Metodo SHRP 65
3.5 Decadimento prestazionale del c.b. 67
3.5.1 Il fenomeno della rottura per fatica 68

3.5.2 Il fenomeno di accumulo di deformazioni permanenti 72
4 Lo studio a mesoscala del conglomerato bituminoso..... 77
4.1 Il concetto di mesoscala e mesostruttura 79
4.2 Modelli reologici al continuo..... 81
4.2.1 Modello elastico lineare..... 82
4.2.2 Modelli viscoelastici..... 82
4.2.3 Modelli elastoplastici..... 85
4.2.4 Modelli viscoplastici..... 88
4.2.5 Modelli viscoelastoplastici..... 92
4.3 Modellazione di materiali eterogenei..... 94
4.3.1 Tecniche di modellazione e discretizzazione 98
4.3.2 Modelli FEM.....105
4.3.3 Modelli DEM 107
4.3.4 Report sullo stato dell'arte 109
4.3.5 Considerazioni conclusive 118
5 Cenni di modellazione ad elementi finiti e topologia della mesh 123
5.1 Entità topologiche primarie 124
5.2 Proprietà degli elementi finiti.....126
5.3 Proprietà di gruppi di elementi.....128
5.4 Operazioni topologiche di una mesh tetraedrica 130
5.4.1 Determinazione delle facce di una mesh tetraedrica 131
5.4.2 Determinazione dei tetraedri connessi ad una faccia 132
5.4.3 Determinazione degli elementi adiacenti.....133
5.4.4 Determinazione del contorno di una mesh.....134

5.4.5 Determinazione degli elementi connessi ad un nodo 134
5.5 Procedure preliminari di calcolo sulla mesh 136
5.6 Modellazione della frattura 142
5.6.1 Extended Finite Element Method (X-FEM) 142
5.6.2 Cohesive Zone Model (CZM) 143
5.7 Generazione di un Cohesive Zone Model 144
5.7.1 Definizioni topologiche 145
5.7.2 Algoritmo di inserimento elementi coesivi 147
6 Proposta di un approccio innovativo per la modellazione mesostrutturale del c. b. 151
6.1 Modellazione voxel ibrida 153
6.2 La metodologia proposta 156
6.2.1 Generazione della mesh 158
6.2.2 Criteri di valutazione del rapporto tra le fasi e della granulometria 161
6.2.3 Processo di riproduzione di aggregati compatibili con il fuso granulometrico 166
6.2.4 Modalità di generazione dell'aggregato e criteri d'ingrandimento 170
6.2.5 Modellazione del mastice di bitume 174
6.2.6 Modellazione del film di bitume 175
6.2.7 Modellazione dei vuoti 177
6.3 Scalabilità del modello 178
7 Simulazioni 181
7.1 Generazione di un provino di forma cilindrica 181
7.2 Test di compressione diametrale 188
7.3 Simulazione di prove a rottura 194
8 Conclusioni 199

Appendice A Funzioni 202
Bibliografia 203

Parole chiave:

Bituminous mixtures;
mesoscale;
packing algorithm;
finite element method;
voxel;
Cohesive Zone Model;
voids;
multiscale analysis;
cracking;

1 Introduzione

Lo studio delle sovrastrutture stradali, per le proprie peculiarità, desta interesse tanto per la sua attualità quanto, soprattutto, per le ripercussioni che lo stesso è in grado di riflettere nella realtà quotidiana delle pavimentazioni, apportando un contributo indispensabile per la sostenibilità delle infrastrutture.

I conglomerati bituminosi (d'ora in avanti anche c.b.), nonostante siano studiati ed utilizzati da decenni a livello mondiale, sono ancora caratterizzati da talune problematiche che ne impediscono un utilizzo pienamente soddisfacente. Nel corso degli anni, infatti, molteplici interventi migliorativi sono stati apportati ai c.b., grazie sia allo sviluppo di tecniche innovative di produzione, sia allo studio di nuovi leganti, quali polimeri ed additivi speciali, capaci di migliorarne le caratteristiche tanto fisiche quanto meccaniche.

Queste innovazioni non rappresentano, tuttavia, l'unico contribuito all'evoluzione del sistema. Di recente, infatti, occorre registrare anche il subentro di innovative metodologie e filosofie di prova, utilizzate al fine di stimare le caratteristiche e le prestazioni del prodotto una volta che questo sia messo in esercizio, allontanandosi da un'imposizione prescrittiva "tradizionale", concernente le proprietà dei materiali, per adottare un approccio "moderno", di tipo prestazionale. A seguito di tale nuovo *modus operandi,* i capitolati tecnici delle più moderne opere di progettazione o di manutenzione stradale, stanno andando incontro ad un progressivo, seppur lento, processo di innovazione.

Alla luce di tale orientamento, sono stati stabiliti nuovi criteri di soddisfacimento di performance (vedi e.g. l'ormaiamento e le relative prove) direttamente legati alla durabilità e all'utilizzo in opera del materiale, al contrario di altre prove classiche (e.g. prova Marshall) che sottopongono il materiale a stati tensionali e percorsi di carico ben lontani da quelli presenti in esercizio.

Premesso che lo studio del c.b. attraverso ricerche sperimentali richiede spesso un ingente esborso di risorse economiche e temporali e che, per questo motivo, sempre più ricercatori orientano i loro studi

verso le simulazioni numeriche, risulta di primaria importanza avere dei validi modelli numerici ben definiti a supporto di quest'ultime.

La reazione del materiale alle sollecitazioni esterne, espressa in termini di tensioni e deformazioni, è strettamente dipendente dalla struttura complessa del conglomerato, che di per sé è eterogenea ed anisotropa.

L'esame di questa miscela secondo l'approccio tradizionale, era condotto mediante modelli costitutivi al continuo e simulazioni numeriche tendenti a rappresentare macroscopicamente la risposta meccanica del materiale. Tali modelli si sono rivelati però inadatti per indagare le correlazioni tra la deformazione macroscopica della miscela e la corrispondente risposta microstrutturale. Per tale motivo, negli ultimi anni, come si diceva poc'anzi, gli studiosi hanno limitato l'utilizzo di approcci tradizionali e si sono orientati verso nuove frontiere della modellazione. L'auspicio è, pertanto, quello di riprodurre virtualmente una struttura eterogenea del materiale che sia sufficientemente rappresentativa delle diverse fasi che lo compongono e del carattere discreto della materia. A tal fine, sono già stati sviluppati e proposti diversi metodi di modellazione dei materiali eterogenei (sia con elementi finiti che discreti) che, come verrà successivamente esaminato, sono connotati tanto da punti di forza quanto di debolezza.

Il peculiare elemento di novità che contraddistingue il presente elaborato è rappresentato dall'approccio non convenzionale attraverso cui si è guardato al modello. Si ritiene, infatti, che al fine di conoscere con un buon grado di esattezza il conglomerato nel suo complesso, occorre analizzarlo dettagliatamente nelle sue singole fasi che si relazionano a livello mesostrutturale. Ecco, dunque, che si introduce il concetto di mesostruttura con il quale si intende la composizione del materiale osservata da una scala intermedia, detta anche "mesoscala", nella quale può essere messa a fuoco l'interazione tra i diversi componenti del materiale eterogeneo.

Il modello proposto persegue, dunque, lo scopo di migliorare l'interpretazione della risposta micro-meccanica delle fasi del sistema in condizioni limite – quali la rottura per fatica o l'accumulo di deformazioni permanenti – e, proprio a tal fine, occorre analizzare

campioni di materiale che abbiano una dimensione di circa un ordine di grandezza superiore, rispetto a quella degli elementi che lo compongono.

Solo adottando la scala di misura così descritta è possibile rappresentare l'eterogeneità del materiale potendo superare, da un lato, l'indeterminazione del comportamento macroscopico e trascurare, dall'altro, i fenomeni che intervengono a livello microscopico, a vantaggio di ragionevoli tempi di elaborazione.

Questa metodologia di studio, consente, altresì, di mettere in evidenza, con una certa accuratezza, tutti quei fattori che intervengono sensibilmente sul comportamento del materiale composito, quali il contenuto di bitume, la forma dell'aggregato, la distribuzione granulometrica, la percentuale dei vuoti, ecc.

La generazione di modelli mesostrutturali del c.b. attinenti alla realtà è alquanto articolata e complessa perché il materiale, a causa della sua intrinseca variabilità, non è rappresentabile in modo univoco e possiede una pseudo-struttura con forme irregolari, la cui dislocazione nello spazio varia sensibilmente da punto a punto.

Già dalla lettura dell'introduzione al tema è possibile tracciare, seppur a grandi linee, il percorso che si intende seguire e, soprattutto, l'obiettivo da raggiungere: la realizzazione di un modello numerico il quale, sebbene le difficoltà evidenziate, sia tale da interpretare, in modo dettagliato e il più vicino possibile alla realtà, il degrado strutturale di una pavimentazione flessibile.

2 Modellazione e progettazione delle sovrastrutture stradali

Nel presente capitolo si cercherà di delineare un quadro sintetico circa le sovrastrutture stradali, con particolare riferimento alle tipologie flessibili e semirigide, al fine di contestualizzare lo studio ed il progetto dei materiali stradali, avendo riguardo sia alla loro specifica applicazione, sia alle qualità che essi dovranno mostrare in opera.

Le pavimentazioni sono normalmente classificate in letteratura in tre tipologie:

- flessibili;
- semi-rigide;
- rigide.

Il nome stesso che viene assegnato ad ognuna di esse suggerisce il tipo di classificazione usualmente seguito che differenzia la pavimentazione in funzione dell'entità della deformazione che la stessa subisce sotto l'azione dei carichi.

Tra le pavimentazioni cd. rigide, possono certamente essere elencate quelle in calcestruzzo; tra le flessibili si annoverano quelle in conglomerato bituminoso; differiscono, infine, da queste ultime le pavimentazioni semirigide, nelle quali, ed è in ciò che sta la diversità, è presente uno strato aggiuntivo di fondazione in misto cementato.

In Figura 2-1 si riporta uno schema delle pavimentazioni.

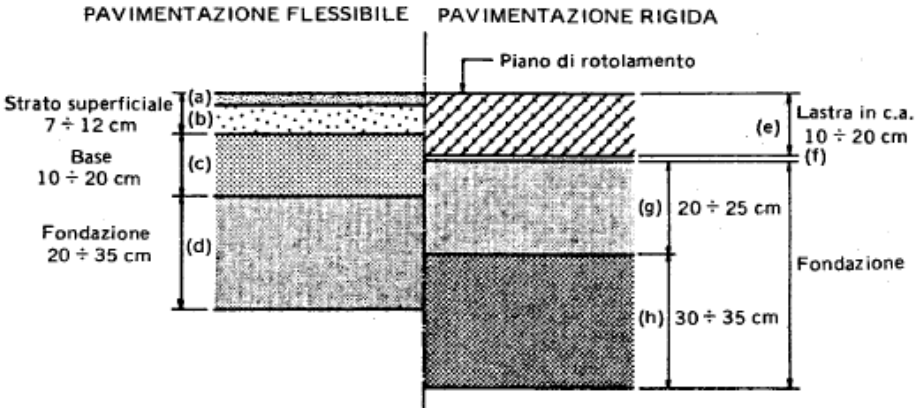


Figura 2-1 - Confronto tra pavimentazione rigida e flessibile

2.1 Brevi cenni storici

Come si diceva in fase introduttiva, l'evoluzione tecnologica applicata alle pavimentazioni stradali si è sviluppata attraverso un lento, ma progressivo, processo di cambiamento, per il quale è stato necessario, tra l'altro, il trascorrere di un arco temporale anche abbastanza lungo. Le tecniche utilizzate, infatti, compatibilmente alle esigenze e agli strumenti offerti dal contesto tecnologico di riferimento, sono state realizzate al fine di soddisfare i bisogni della società che viveva in quel determinato contesto storico.

Attraverso l'analisi di un brevissimo excursus, le tappe fondamentali da richiamare sono essenzialmente tre, così rappresentate: partendo dagli albori, occupano un ruolo centrale le tecniche messe a punto dagli antichi Romani i quali, con i limitati mezzi di cui potevano disporre, riuscirono a costruire le prime strade (chiamate "pavimentum") rigorosamente in pietra; successivamente, nel secondo periodo del nostro ideologico percorso storico, merita cenno la pavimentazione cd. in "macadam", in cui, per la prima volta, fu introdotto un "legante", necessario, in questa fase, al fine di sopperire alla maggiore richiesta di resistenza, dovuta alle esigenze di mobilità della rivoluzione industriale del XIX secolo; fino ad arrivare, infine, ai giorni nostri, terza fase in cui la crescita dell'ingegneria stradale non si arresta anzi, introducendo nuovi criteri di progettazione sempre più attenti al territorio, continua la sua evoluzione.

Nel recente passato, infatti, sono emerse delle nuove esigenze che fino a qualche decennio fa erano, se non inesistenti, quantomeno trascurate tanto dagli studiosi quanto dagli operatori, quali, a titolo esemplificativo, la permeabilità, la fonoassorbenza o la sostenibilità ambientale ed economica, che si pongono ben oltre il precipuo scopo della realizzazione delle arterie stradali (ovvero la costruzione di un robusto piano viabile), ma delle quali occorre necessariamente tenere conto, essendo diventate elementi imprescindibili ai fini della progettazione stradale.

Dall'analisi della Figura 2-1, si evince come una delle caratteristiche comuni alle tre diverse tipologie di pavimentazione è rappresentata dalla disposizione in strati. Tale comune articolazione si

spiega facilmente poiché, qualsiasi tipologia verrà scelta ai fini della realizzazione della pavimentazione, è quella che, meglio di altre, è più favorevole in termini di modalità e praticità costruttiva.

Come si avrà modo di specificare meglio in seguito, lo spessore caratterizzante i vari strati rappresenta il frutto di un'attenta ponderazione del progettista tra i materiali che dovranno costituire ogni singolo strato, per un verso e, le specifiche prestazioni richieste, per altro, dai quali, dunque, congiuntamente, non potrà prescindersi ai fini della realizzazione dell'opera.

In generale, si possono distinguere quattro ampie categorie di dati per il progetto di una sovrastruttura:

- traffico e carico;
- ambiente;
- materiali;
- modelli di rottura.

2.2 Prestazioni richieste alla sovrastruttura

Si diceva poc'anzi che da oltre duemila anni la costruzione delle strade sia profondamente mutata e sia, in realtà ancora oggi, in continuo cambiamento *in melius*. Dall'utilizzo della pietra, quale strumento prediletto degli antichi Romani cui si accennava in sede di ricostruzione storica, si è passati, oggi, a materiali del tutto diversi quali: calcestruzzo, polimeri e, da ultimo, materiali ecologici.

In tempi più recenti, tra l'altro, proprio con particolare riferimento a tale ultimo profilo, studi sempre più attenti sono stati riservati alla qualità dei componenti delle pavimentazioni stradali, tanto che i passi da gigante mossi in questo ambito hanno fatto sì che da uno specifico profilo della materia, si sia generata una vera e propria branca dell'ingegneria: l'ingegneria dei materiali. Le prestazioni richieste ad una pavimentazione stradale si possono suddividere in due grandi categorie: strutturali e funzionali.

Le prime derivano dall'esigenza di costruire un piano viabile robusto ed in grado di sopportare, per un periodo di tempo sufficientemente lungo, i carichi stradali che graveranno su di esso; le

seconde sono maggiormente legate a concetti di comfort della circolazione, sicurezza e durabilità.

Volendo schematizzare quanto sopra è possibile, dunque, enucleare le seguenti prestazioni che una pavimentazione stradale deve avere:

- sopportare i carichi di traffico, scongiurando rotture od altre alterazioni macroscopiche del piano di rotolamento;
- assicurare all'utenza una superficie di idonea regolarità e di aderenza per il comfort e la sicurezza della circolazione, nel rispetto dell'ambiente;
- salvaguardare gli strati della pavimentazione stessa ed il terreno sottostante (sottofondo) dalle azioni atmosferiche (dal gelo in particolare).

Ogni singola prestazione descritta non può essere perseguita e, successivamente, attualizzata singolarmente, come se fosse una realtà a sé stante ma, per converso, deve necessariamente essere relazionata a quei caratteri che, nella realtà moderna, assurgono ad elementi imprescindibili inerenti al territorio circostante quali l'impatto sociale ed economico.

Al giorno d'oggi, infatti, è già possibile registrare un'attenzione sempre crescente verso la sostenibilità delle infrastrutture che, per un verso, porta a realizzare strade a costi sempre più competitivi e, per altro, soprattutto per quanto concerne l'aspetto su cui ora ci si vuole soffermare, predilige il minor impatto ambientale possibile.

Un esempio moderno è rappresentato dall'utilizzo del polverino di gomma da pneumatici esausti nelle miscele, il quale conferisce un minor consumo del battistrada e, contestualmente, ne riduce la rumorosità.

Le pavimentazioni stradali più innovative ed ecocompatibili, inoltre, sono realizzate con prodotti polimerici non derivati dal bitume che non richiedono di essere riscaldati.

Non è escluso che in un prossimo futuro, specie a seguito di nuovi investimenti, del bitume se ne farà sempre meno uso a favore di leganti stradali che, perseguendo il medesimo obiettivo rispetto al primo, (legando comunque gli aggregati in maniera ottimale) riescano a raggiungerlo senza alcuna conseguenza sul fronte ambientale.

Le nuove strade “ecologiche” hanno molteplici potenzialità: rappresentano, ad esempio, una soluzione ideale laddove vigono categorici vincoli paesaggistici che impediscono l’utilizzo di asfalti neri. Attraverso una gamma di colori particolarmente ampia, infatti, questi materiali consentono un attraversamento del paesaggio più naturale ed armonico, preservando, in questo modo, i contesti rurali e storici; si rivelano, ancora, adattissime per le aree a traffico leggero come piazzette, abitazioni private, piste ciclabili e pedonali, con vantaggi, in questo caso, non sono solo di natura ecologica, bensì anche economica.

Il continuo interesse verso l’ambiente ha consentito, infine, lo sviluppo di un’ulteriore forma di pavimentazione: la cd. pavimentazione fotocatalitica. La peculiarità di quest’ultima tipologia è rappresentata dalla specifica composizione chimica che la caratterizza, il biossido di titanio di cui è composta, infatti, reagendo all’esposizione alla luce del sole, velocizza tutta una serie di reazione chimiche benefiche poiché non inquinanti, antibatteriche e improduttive di rifiuti.

Le principali sfide che investono i players del mercato riguardano lo sviluppo di tecniche che permettano di realizzare pavimentazioni a impatto zero, o con il più alto rapporto prestazioni-impatto sull’ambiente al fine di consentirne l’impiego più esteso possibile.

Alla luce della crescente sensibilità verso le suddette tematiche di cui si è appena cercato di dare contezza, la ricerca svolta ha tentato di offrire un proprio contributo anche a queste nuove esigenze, fornendo strumenti innovativi finalizzati ad una progettazione ottimizzata della miscela che eviti un cattivo impiego dei materiali, con le note e negative conseguenze in termini di sprechi i quali, grazie agli attuali livelli conoscitivi raggiunti, non sono più tollerabili.

Portanza

Per portanza – o capacità portante – si intende la resistenza che le pavimentazioni manifestano verso le deformazioni di tipo elastoplastoviscoso. Tale caratteristica dipende da una serie di fattori, tra i quali si annoverano: natura, porosità e contenuto d'acqua della pavimentazione; entità, area di impronta e velocità di applicazione del carico, nonché numero di applicazioni del carico stesso.

Questa proprietà strutturale della pavimentazione può essere analizzata mediante l'Heavy Falling Weight Deflectometer (H.W.D.), deflettometro dinamico a massa battente, in grado di simulare adeguatamente le condizioni reali di carico di un aeromobile.

Per ogni punto di misura dell'H.W.D., mediante software che si avvalgono del processo di backcalculation, vengono stimati i valori dei moduli degli strati in conglomerato bituminoso, di fondazione e del sottofondo nelle condizioni di prova. Tramite ulteriori analisi si possono anche ottenere: la vita residua a fatica delle pavimentazioni in anni; il valore del modulo dello strato in conglomerato bituminoso riferito a 20° C; lo strato critico e il rinforzo teorico necessario a far fronte al traffico di progetto.

Per garantire una regolarità del piano viabile e consentire un'accettabile vita utile della pavimentazione è necessario, inoltre, che le deformazioni misurate siano contenute. Ciò si ottiene con maggiori spessori e migliori moduli della pavimentazione che, ovviamente, si traducono in maggiori costi a carico dell'ente committente per la costruzione della stessa.

Regolarità

Dalle caratteristiche superficiali della pavimentazione discendono le seguenti proprietà: regolarità, rugosità, drenabilità e rumosità.

Sulla base di relazioni fisiche, la World Road Association (PIARC) ha definito 4 domini in cui suddividere la tessitura di una pavimentazione: la microtessitura, la macrotessitura, la megatessitura e l'irregolarità.

La microtessitura indica la deviazione dalla superficie media del piano ideale di rotolamento, con lunghezza d'onda inferiore a 0,5 mm e ampiezze del profilo comprese nell'intervallo 1 μm ÷ 0,2 mm; dipende dalla natura mineralogica e petrografica degli aggregati del materiale ed è, inoltre, influenzata dagli effetti del clima, delle stagioni e dall'azione del traffico. Tale caratteristica superficiale provoca aderenza (soprattutto) alle basse velocità e comporta l'usura degli pneumatici poiché il suo ruolo è quello di penetrare la gomma dello pneumatico al fine di creare elevate pressioni di contatto a favore dell'aderenza stessa.

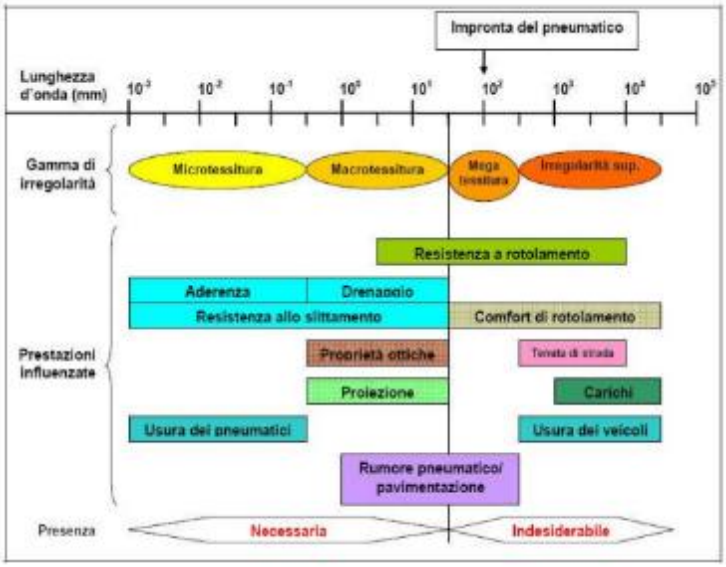


Figura 2-2 - Domini della tessitura e influenza delle irregolarità superficiali sull'interazione veicolo-strada

La macrotessitura indica la deviazione dalla superficie media, che costituisce il piano ideale di rotolamento, con lunghezze d'onda tra 0,5 mm e 50 mm e con ampiezze tra 0,2 mm e 10 mm. In questo dominio ricadono la dimensione, la forma e la disposizione degli aggregati.

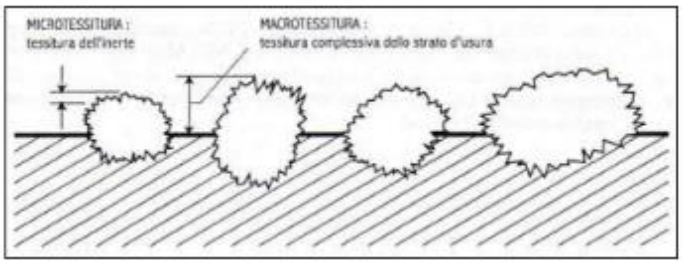


Figura 2-3 - Micro e macro tessitura

Tale caratteristica incide sulle proprietà ottiche del manto stradale e sul drenaggio dell'acqua nell'area di contatto con lo pneumatico, poiché gli spazi intergranulari formano dei micro canali che funzionano da serbatoio e da percorsi per l'allontanamento dell'acqua.

La megatessitura rappresenta il dominio intermedio fra la macrotessitura e le irregolarità superficiali. Le deformazioni dal piano medio della pavimentazione che la caratterizzano hanno l'ordine di grandezza dell'area di contatto pneumatico-pavimentazione (orizzontalmente 50 ÷ 500 mm, verticalmente 1 ÷ 50 mm). Questa

caratteristica della tessitura influenza considerevolmente i fenomeni legati al rumore di rotolamento, e alle vibrazioni del veicolo e allo smaltimento delle acque superficiali.

Da ultimo, un cenno anche all'irregolarità che può interessare la pavimentazione. La geometria delle stesse ha una lunghezza d'onda compresa tra 50 cm e 50 m; all'interno di tale range sono comprese le buche e le ondulazioni della superficie. Generalmente sono prodotte da carichi di traffico, effetti ambientali, materiali impiegati durante la costruzione e difetti di posa in opera. Infatti, non è del tutto infrequente osservare lungo le strade che percorriamo ogni giorno, lesioni ed irregolarità causate dall'utilizzo di prodotti non adeguati al traffico che la strada deve tollerare, oppure da una loro messa in opera non rispondente alle regole dell'arte. Tali difetti sono inevitabilmente causa di disagio e, non di rado, anche di incidenti. Occorre anche sottolineare come il conglomerato debba essere steso e compattato nell'intervallo di temperatura pertinente con il tipo di bitume utilizzato, poiché miscele eccessivamente calde si riflettono in superfici irregolari, con frequenti strappi, fessurazioni e scivolamenti sullo strato sottostante; per converso, miscele fredde non possono essere efficacemente compattate e ciò darà origine per l'appunto a giunti irregolari, sgranamenti superficiali ed eccesso di vuoti. I metodi di rilievo del profilo superficiale si suddividono in due categorie: metodi manuali (stadia e livello) e profilometri inerziali (APL, ARAN etc.). Uno dei parametri, standardizzato e recepito a livello mondiale, per la misura della regolarità è l'IRI (International Roughness Index) che è dato dall'accumulo di spostamenti verticali di un veicolo standard per unità di spostamento (espresso di norma in m/km).

Aderenza

L'aderenza è la forza che resiste al moto relativo tra lo pneumatico di un veicolo e la pavimentazione. Questa forza resistente è generata quando lo pneumatico ruota o scivola sulla pavimentazione come illustrato in Figura 2-4.

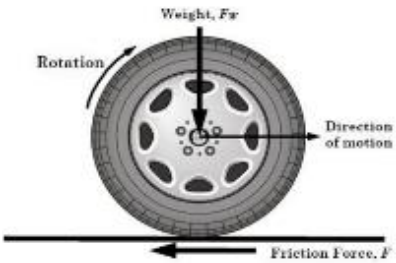


Figura 2-4 - Diagramma delle forze agenti su uno pneumatico

L'aderenza viene espressa utilizzando il coefficiente numerico μ, che è il rapporto tra la forza di attrito, generata tra pneumatico e la superficie orizzontale di scorrimento, e il carico verticale:

$$\mu = \frac{F}{F_W} \tag{2-1}$$

L'aderenza assume un ruolo fondamentale per quanto concerne la sicurezza della circolazione poiché è grazie ad essa che i veicoli si mantengono in carreggiata, permettendo altresì al guidatore di controllare il proprio mezzo in maniera sicura, sia in direzione longitudinale che trasversale. L'aderenza, infine, influenza direttamente la minima distanza di frenata, il raggio delle curve e l'elevazione delle stesse[1].

Fonoassorbenza

Il rumore stradale è generato da una sorgente lineare, identificabile con la strada stessa, e si trasmette lungo l'intera lunghezza della via percorsa dai veicoli in direzione radiale alla linea generatrice. Il livello di rumore vicino alla strada, inoltre, non dipende solamente dalla sorgente di traffico che lo genera ma anche dalle caratteristiche dell'ambiente che circonda la via.

Un modello utilizzato per la previsione del livello sonoro generato lungo una strada può essere dato dalla seguente formula:

$$dB(A) = 10 * \log_{10}\left(\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{1+\alpha}\right) \tag{2-2}$$

Dove:

- α= coefficiente di attenuazione;

- d1= distanza del primo punto dalla sorgente;
- d2= distanza del secondo punto dalla sorgente.

Il rumore prodotto dai veicoli deriva principalmente da tre componenti: *Power Unit Noise* per quanto concerne contestualmente le emissioni sonore prodotte dall'insieme delle sorgenti che compongono l'unità di potenza, il motore, che comprende il sistema di iniezione, il sistema di raffreddamento ed il blocco cilindri, lo scarico, le ventole di raffreddamento e i sistemi di trasmissione; *Wind Turbolence Noise* che riguarda il rumore generato dalle sorgenti di natura aerodinamica, legate ai vortici di turbolenza intorno e attraverso il veicolo; *Tire-Road Noise*, prodotta dal meccanismo di rotolamento degli pneumatici sulla superficie stradale.

Dalla velocità del veicolo e dalla combinazione delle due superfici a contatto dipende il rumore generato dalla loro interazione, in particolare poi, la componente di rumore causata dall'unità di potenza e quella prodotta dall'interazione ruota-pavimentazione sono le principali cause del rumore stradale.

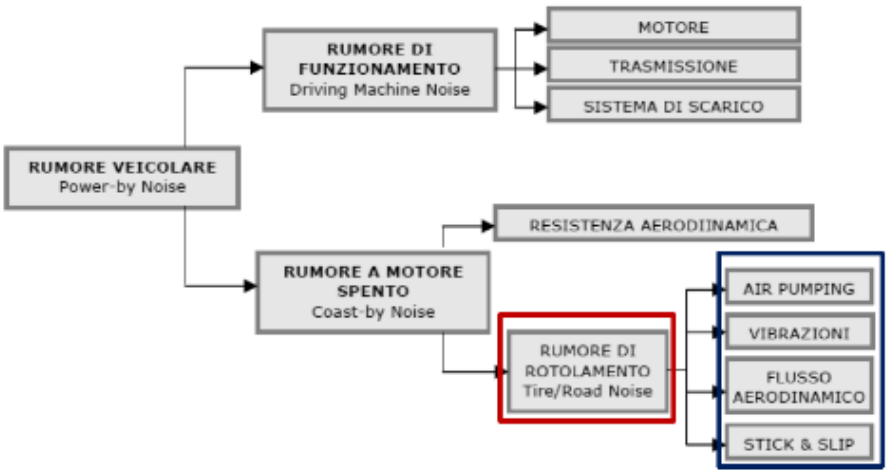


Figura 2-5 - Insieme delle componenti emissive del rumore veicolare[2]

La componente aerodinamica ed il rumore da rotolamento costituiscono il rumore *"a motore spento"*, ossia quello determinato dal veicolo in movimento senza che vi sia alcun contributo da parte delle sorgenti che ne consentono il funzionamento. L'insieme delle componenti emissive legate ai meccanismi che rendono possibile il

movimento è, invece, il rumore *"di funzionamento"*, indipendente dal regime di marcia.

Il rumore prodotto dall'interazione tra pneumatico e superficie stradale è preponderante solo al di sopra di una certa velocità, mentre a basse velocità di percorrenza la componente dominante è quella riferita agli organi che consentono la trazione[2].

Permeabilità

Lo schema strutturale di una pavimentazione drenante differisce da quello di una pavimentazione tradizionale soltanto per gli ultimi due strati superficiali.

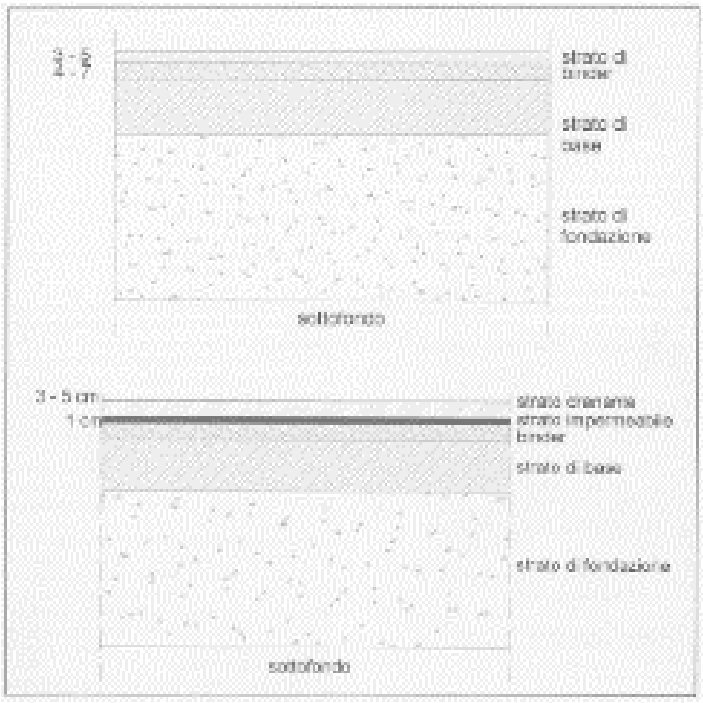


Figura 2-6 - Schema strutturale di una pavimentazione convenzionale (sopra) e di una drenante (sotto) [3]

Lo strato impermeabile posto immediatamente al di sotto dello strato superficiale, drenante, è costituito da una malta bituminosa chiusa, al fine di impedire percolazioni di acque negli strati portanti della pavimentazione, di formare un facile piano di raccolta e scorrimento per le acque di drenaggio e compensare piccole irregolarità superficiali dello strato di binder.

Il comportamento meccanico dell'aggregato lito-bituminoso dello strato drenante dipende dalla complessa interazione di due gruppi di fattori: il primo è direttamente correlato alle caratteristiche dell'aggregato litico (granulometria, stato di addensamento, forma dei granuli, dimensione, ecc.); il secondo dipende dalle caratteristiche fisico-chimiche del legante bituminoso (composizione chimica, viscosità, potere legante, presenza di additivi, ecc.).

L'impiego dei conglomerati drenanti favorisce le condizioni di sicurezza della circolazione stradale in relazione ai seguenti aspetti: riduzione del rischio di aquaplaning (improvvisa e totale perdita di aderenza dell'autoveicolo e conseguente perdita del controllo di guida da parte del conducente); miglioramento delle condizioni di visibilità; riduzione del livello del rumore prodotto nella banda delle frequenze medio alte; miglioramento delle caratteristiche di aderenza sul bagnato[3].

Per quanto attiene il primo aspetto, l'allontanamento rapido dell'acqua di ruscellamento dalla superficie stradale, assorbita dalla pavimentazione, riduce notevolmente il rischio dell'aquaplaning. Questo fenomeno si attiva durante la marcia di un autoveicolo quando un velo liquido si interpone tra pneumatico e pavimentazione stradale. Esiste, inoltre, una velocità di soglia per l'attivazione del fenomeno in funzione dei seguenti parametri:

- spessore del velo liquido;
- caratteristiche reologiche del liquido;
- disegno e profondità del battistrada;
- peso dell'autoveicolo.

2.3 Il sistema multistrato

Ogni pavimentazione è costituita da una successione di strati di materiali diversi. Tale variegata composizione presuppone prestazioni diverse a seconda della tipologia di riferimento e, pertanto, occorrerà indagare, apriori, circa la metodologia di studio necessaria al fine di conoscere le singole prestazioni richieste.

Data la suddetta varietà è abbastanza scontato immaginarsi come non esistano soluzioni univoche o universali, poiché gli strati vengono

scelti in base alle caratteristiche proprie del terreno e al tipo di traffico per cui la strada è progettata.

La scelta ottimale sarebbe rappresentata dal risultato di un ponderato bilanciamento, effettuato tenendo in debito conto, da un lato, dei pro e dei contro di ogni singolo materiale (che per ovvie ragioni incideranno sulla decisione a seconda della destinazione finale) e, dall'altro, dell'aspetto economico, non potendo, tra l'altro, adottare soluzioni che comportino spreco di danaro pubblico.

Contestualizzando quanto appena esposto all'oggetto principale di indagine del presente lavoro, le pavimentazioni flessibili, si può evidenziare come i diversi strati di conglomerato bituminoso di cui queste risultano, usualmente, composte siano: usura, binder e base, posti superiormente ad uno strato di fondazione in misto granulare, come rappresentato in Figura 2-7.

Questi strati poggiano, a loro volta, sul sottofondo che, generalmente, è lo strato più superficiale del terreno, del rilevato o della trincea, fra gli strati che compongono il corpo stradale.

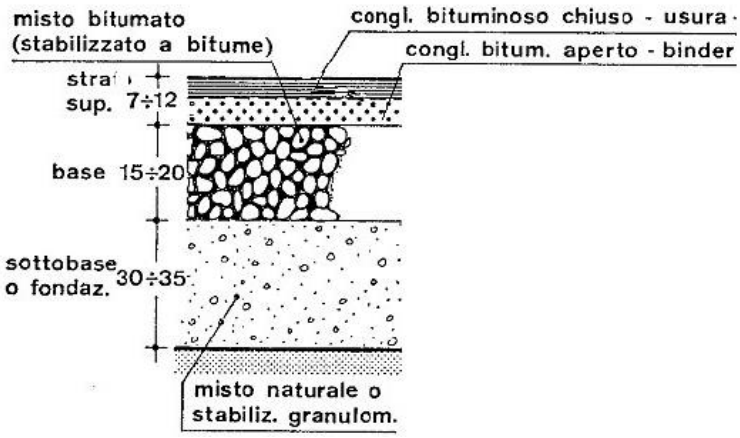


Figura 2-7 - Strati di una pavimentazione flessibile

Gli spessori dei vari strati dovrebbero in teoria rappresentare il frutto di un dimensionamento, tuttavia, nella maggior parte dei casi, si registra la tendenza volta ad aumentare l'estensione di tali aree man mano che si scende più in profondità.

Tale preferenza trova la sua ragion d'essere in una circostanza di ordine prettamente economico, infatti, è noto come a strati inferiori corrispondano costi minori, anche se, e qui il deficit, inversamente

proporzionali alla qualità del materiale. Tale negativo risvolto, tuttavia, rappresenta un accettabile compromesso, incidendo su una superficie che, per la posizione interna in cui è collocata, non subisce le medesime sollecitazioni dei veicoli che si possono registrare in zone più superficiali e che si attenuano, per converso, all'aumentare della profondità.

Le combinazioni di strati e materiali che possono garantire un'adeguata portanza alla pavimentazione sono molteplici, se non addirittura infinite, ma il cerchio delle soluzioni adottabili si restringe notevolmente se si vogliono prediligere quelle che garantiscano contestualmente l'economicità e il rispetto di vincoli (quali ad esempio la facilità di reperimento di alcuni materiali) e che, come si diceva poc'anzi, se trovate, rappresentano l'ottimo.

2.4 Le azioni del traffico

Tra i molteplici fattori in grado di influenzare una pavimentazione stradale rilevano tanto le caratterizzazioni del traffico quanto quelle del carico, ognuna delle quali presenta specifici profili di cui occorre tenere conto e che così possono essere enucleati:

Dati relativi ai volumi di traffico:

- volume annuale di traffico;
- fattori di distribuzione per corsia;
- fattori di distribuzione per direzione;
- classi di distribuzione dei veicoli;
- fattori di crescita del traffico;
- velocità media e operativa.

Dati relativi alla configurazione del carico:

- fattori di distribuzione degli assi di carico;
- configurazioni base degli assi e delle ruote;
- caratteristiche dello pneumatico;
- pressione di gonfiaggio dello pneumatico;
- fattore di distribuzione trasversale.

Per quanto concerne, in particolare, gli elementi relativi al secondo dei profili su citati, è possibile osservare come la modellazione del comportamento di una sovrastruttura stradale sia fortemente condizionata dalle ipotesi connesse alla schematizzazione dei carichi trasmessi dai veicoli i quali, tanto per la loro entità, quanto per il loro tempo di applicazione, rappresentano un elemento molto variabile.

Si accennava già in fase introduttiva come le pavimentazioni stradali risultino influenzate da una molteplicità di fattori.

I soli pneumatici, ad esempio, benché unico elemento, danno seguito a loro volta ad una serie di conseguenze: le sollecitazioni sulla sovrastruttura originano, infatti, proprio da essi i quali, tramite le loro impronte sulla pavimentazione, trasmettono i carichi derivanti dagli assi dei veicoli; le ruote, inoltre, seppur appartenenti ad un singolo asse, possono essere singole o gemellate; la distanza tra gli assi di un veicolo può variare notevolmente tale che si abbia o una sovrapposizione dei rispettivi campi di deformazione, come accade negli assi tandem, tridem e così via, ovvero che la loro distanza sia grande a sufficienza da non ingenerare alcuna interazione, in questo caso si parla di assi singoli.

La suddetta elencazione, seppur estremamente sintetica, è, tuttavia, sufficiente al fine di avere contezza di come il sistema di forze scambiate tra pneumatico e pavimentazione sia alquanto articolato; inoltre, è a seconda della tipologia che viene in rilievo che l'area di impronta può assumere una forma pseudo-rettangolare ovvero pseudo-ellittica, mutando rispettivamente per pneumatici di tipo radiale o per quelli convenzionali[4].

Un ulteriore elemento non trascurabile è offerto dalla eterogeneità della distribuzione delle pressioni tale poiché rappresenta il risultato di un complesso equilibrio tra le forze di rigidezza della struttura dello pneumatico e la pressione di gonfiaggio, in particolare, in questo quadro entrano in gioco tanto la risultante delle pressioni sul battistrada, quanto la risultante delle pressioni interna di gonfiaggio, quanto ancora la risultante delle tensioni interne alle pareti dello pneumatico.

Detto in termini semplicistici: quando la pressione di gonfiaggio è alta le spalle dello pneumatico sono tese facendo sì che il carico

trasmesso alla pavimentazione si distribuisca su un'area inferiore a quella normale, e trasmettendo quindi una pressione sulla pavimentazione maggiore di quella di gonfiaggio, come mostrato in Figura 2-8; viceversa, nel caso in cui la pressione di gonfiaggio sia inferiore a quella nominale indicata dalla casa madre, le pressioni si distribuiscono non uniformemente su un'area d'impronta maggiore, determinando una pressione sulla pavimentazione minore di quella di gonfiaggio.

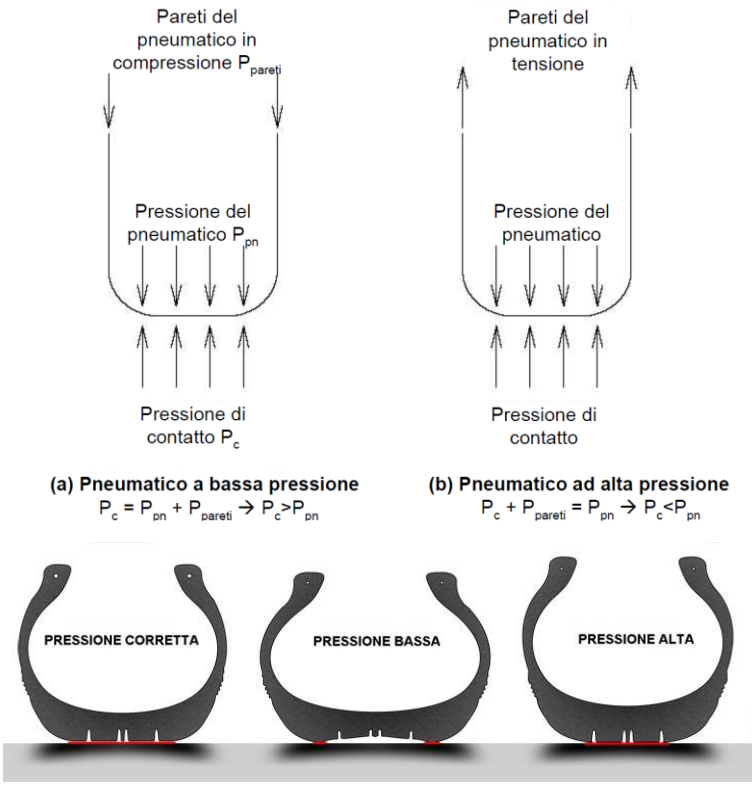


Figura 2-8 - Pressione di gonfiaggio e deformazione dello pneumatico [5]

2.5 Azioni ambientali

Azioni termiche

Oltre alle azioni di carico e di traffico di cui si è già detto nel paragrafo precedente, esistono anche altri fattori in grado di incidere sulle prestazioni di una pavimentazione stradale. I materiali utilizzati ai fini della sua realizzazione, ad esempio, risentono, talora in misura

molto notevole, delle diverse condizioni climatiche caratterizzanti le varie aree territoriali.

La temperatura di esercizio, in particolare, gioca un ruolo fondamentale poiché, al suo variare, le risposte meccaniche del conglomerato bituminoso cambiano sensibilmente: alle basse temperature il conglomerato bituminoso mostra un comportamento maggiormente rigido ed una rottura di tipo fragile; alle alte temperature, per converso, si ha una minore rigidezza e si manifesta una rottura duttile.

Le variazioni termiche ambientali, inoltre, forniscono un contributo significativo al degrado del materiale a causa delle oscillazioni termiche sia giornaliere che stagionali che sollecitano continuativamente la sovrastruttura.

In un corpo non vincolato rigidamente, ovvero lasciato libero di contrarsi o espandersi, le variazioni termiche di tipo uniforme non producono alcuna tensione aggiuntive interna al corpo, ma si ha variazione di lunghezza calcolabile mediante la seguente formula:

$$\Delta L = \lambda \, L_0 \, \Delta T \tag{2-3}$$

dove:

- λ è il coefficiente di dilatazione termica lineare [°C-1];
- L0 è la lunghezza iniziale del corpo;
- ΔT è la variazione di temperatura.

Nel caso in cui il corpo risulti vincolato, viceversa, l'impossibilità di muoversi genera uno stato di tensioni interne aggiuntive.

Supponendo che un corpo sia libero di muoversi, un'espressione che consente di valutare tali tensioni può essere ricavata eguagliando le variazioni dimensionali dovute ad una sollecitazione esterna e ad una variazione termica.

Il risultato di queste due sollecitazioni produce effetti uguali e opposti tali che il corpo non manifesti alcuno spostamento. Se si considera quindi una trave incastrata agli estremi, la tensione assiale per riportare il corpo alla sua lunghezza originaria è ricavata dalla seguente espressione:

$$\sigma = \lambda \, E \, \Delta T \tag{2-4}$$

dove E è il modulo di rigidezza elastica del materiale.

Pertanto, all'interno della pavimentazione si genera un regime di sollecitazione direttamente correlato alle condizioni climatiche, il quale produce i seguenti effetti:

- modifica la portanza del sottofondo attraverso le precipitazioni meteoriche ed i cicli di gelo e disgelo;
- influenza le caratteristiche meccaniche dei materiali (p. es. i conglomerati bituminosi) per effetto delle temperature che si instaurano nei vari strati;
- induce delle distorsioni termiche, e quindi delle sollecitazioni.

Il regime termico degli strati della pavimentazione varia con la profondità e, quindi, è dipendente non solo dalle condizioni climatiche del momento ma, di più, dalle variazioni di temperatura giornaliera e stagionale e dalla conducibilità degli strati e della sovrastruttura.

Per calcolare il regime termico negli strati di conglomerato bituminoso si utilizzano due espressioni: la formulazione di Barber e quella di Marchionna.

Non potendo riportare entrambe le formule, per ragioni di brevità espositiva, si riporta di seguito solo la prima delle due poiché quella più completa e articolata.

La temperatura nello strato alla profondità z ed al tempo t è valutata attraverso la seguente relazione:

$$T_{pav}(z,t) = T_{ag} + R + \left(\frac{A_g}{2} + 3R\right) \cdot F \cdot e^{-Cx} \cdot \sin\left(0{,}262t - Cx - \tan^{-1}\left(\frac{C}{H+C}\right)\right) \qquad (2\text{-}5)$$

dove:

- T_{pav} è la temperatura della pavimentazione alla profondità z ed al tempo t [°C];
- T_{ag} è la temperatura media giornaliera dell'aria [°C];
- A_g è l'escursione media giornaliera della temperatura dell'aria [°C];
- $R = \frac{2}{3}\left(\frac{b \cdot I}{24 \cdot h_C}\right)$ è il contributo della radiazione solare alla temperatura effettiva dell'aria [°C];
- $H = \frac{h_C}{K}$ con $h_C = 4{,}882(1{,}3 + 0{,}4332v^{0{,}75})$;
- $C = \sqrt{\frac{0{,}131 s \cdot w}{k}}$ [ore$^{0{,}5}$/m];
- $F = \frac{H}{\sqrt{(H+C)^2 + C^2}}$;

- *I* è la radiazione media giornaliera [Kcal/m^2 gg];
- *v* è la velocità del vento [Km/h];
- *b* è il grado di assorbimento della superficie (pari a 0,6 - 0,95);
- *K* è la conduttività termica (per le miscele legate con bitume 1,04 - 1.96) [Kcal/ m ora °C];
- *s* è il calore specifico (per le miscele legate con bitume 0,193 – 0,22) [Kcal/Kg °C];
- *w* è la massa volumica apparente (2400-2500) [Kg/m^3].

Alla luce di quanto esposto si comprende bene come la temperatura giochi un ruolo fondamentale nello studio del conglomerato bituminoso e che un livello conoscitivo soddisfacente delle condizioni ambientali è una base indispensabile da cui occorre partire al fine di realizzare una corretta progettazione.

2.6 La progettazione della sovrastruttura

Alla luce di tutte le considerazioni come sopra illustrate è ormai pacifico come la progettazione di ogni singolo strato della pavimentazione giochi un ruolo cruciale nel sistema poiché è soprattutto questa ad incidere, in maniera rilevante, sulla capacità che una sovrastruttura flessibile deve avere al fine di resistere a ripetute sollecitazioni, a loro volta condizionate, come già detto, sia dal traffico veicolare sia dai fattori climatici.

Una corretta progettazione deve consentire di ottimizzare la cd. "prestazione strutturale" di una pavimentazione e, quindi, di minimizzare, oltre che posticipare il più possibile nel tempo, i diversi fenomeni di degrado che, potenzialmente, potrebbero realizzarsi con il trascorrere degli anni, quali, ad esempio, una deformazione eccessiva degli strati o la rottura per fatica di quelli legati.

I modelli di danno e metodi di stima della resistenza di una pavimentazione possono essere catalogati come segue:

- metodi empirici;
- metodi semi-meccanicistici;
- metodi meccanicistici.

Negli ultimi la sovrastruttura viene schematizzata schematizza come un multistrato elastico e permette, altresì, di calcolare le sollecitazioni e le deformazioni in vari punti della sovrastruttura stessa.

Noto lo stato tensionale e deformativo è stato possibile valutare:

- la durata della pavimentazione, applicando un criterio di fatica che ha permesso di valutare il danno cumulato in funzione del numero di assi standard, tali da provocare l'innesco e la risalita in superficie delle fessure in relazione all'affidabilità richiesta e del numero di passaggi di assi standard alla fine della "vita utile";
- la deformazione permanente, "ormaie", della pavimentazione alla fine della vita utile e verificarne la loro ammissibilità rispetto ad un valore fissato.

2.7 La manutenzione della sovrastruttura

Premesso che la fase della progettazione rappresenta certamente quella in cui occorre mettere in atto tutte le misure più consone al fine di ottenere un'opera secondo tutti i crismi richiesti e rispondenti alle esigenze di cui si è già detto, non devono essere, parimenti, trascurate tutte quelle accortezze che devono essere attuate successivamente alla primordiale, ossia quelle da adottare in fase di manutenzione.

Anche con riferimento a quest'ultime, in realtà, si è potuto registrare negli anni un miglioramento generale delle prestazioni, tanto che l'approccio prestazionale adottato nei più recenti capitolati d'appalto delle infrastrutture stradali ha stabilito dei criteri nuovi volti a garantire al meglio la funzionalità delle opere realizzate, le cui prestazioni devono essere assicurate per periodi sufficientemente lunghi e, soprattutto, inquadrabili all'interno di piani di manutenzione economicamente sostenibili. Da tali esigenze deriva la necessità di utilizzare tecniche e tecnologie innovative per lo studio dei materiali da costruzione e dei relativi fenomeni di degrado.

Per quanto concerne, nello specifico, il profilo relativo alle sovrastrutture stradali flessibili, recentemente sono stati sviluppati dei sistemi di gestione integrata dei processi di manutenzione, volti ad ottimizzare le strategie di intervento nel rispetto dei vincoli economici

e di tempo, nell'esecuzione degli stessi interventi. Fra tutti basti richiamare i sistemi di gestione integrata dei processi di manutenzione, utili al fine di ottimizzare le strategie di intervento nel rispetto dei vincoli economici e di quelli relativi ai tempi di esecuzione degli stessi interventi.

Questi sistemi di gestione delle pavimentazioni (*PMS, Pavement Management System*) hanno subìto nel corso degli anni un'evoluzione esponenziale, soprattutto grazie all'ausilio di modelli predittivi dello stato di un'infrastruttura sempre più affidabili, poiché basati su un numero elevato di informazioni acquisite con tecniche di controllo e di monitoraggio sempre più performanti.

Dopo aver trattato, in questo secondo capitolo, delle generalità delle pavimentazioni stradali, come esse risultano composte, quali i fattori che ne condizionano le prestazioni e di cui occorre tenere conto tanto in fase progettuale quanto in quella manutentiva e, infine, dopo aver passato in rassegna quali sono le più moderne tecniche esistenti offerte nel panorama ingegneristico, sviluppatesi soprattutto a seguito di una tecnologia che, per nostra fortuna, non tende ad arrestarsi, offrendo all'operatore strumenti sempre più all'avanguardia al fine di raggiungere gli auspicati scopi, nel capitolo che segue si intende soffermarsi specificamente sul conglomerato bituminoso, articolando il discorso nelle seguenti tematiche (cui corrispondono i relativi paragrafi): caratteristiche insite del materiale, proprietà fisiche e meccaniche dello stesso, decadimento prestazionale cui può andare incontro, metodi attuali che ruotano attorno al materiale (metodo Marshall, HVEEM e SHRP) per poi, infine, trattare dei fattori determinanti nel progetto della miscela.

3 Caratterizzazione del conglomerato bituminoso

Il conglomerato bituminoso realizzato con miscele di legante a caldo, denominato in inglese "Hot-mix asphalt concrete" (abbreviato comunemente in HMA), è un materiale costituito da due fasi aventi caratteristiche fisiche e meccaniche molto diverse tra di loro: aggregati e bitume.

La scelta di un determinato materiale costituente il conglomerato (ad esempio il tipo di aggregato piuttosto che di legante bituminoso o ancora di eventuali additivi) è fondamentale, poiché avrà un'incidenza rilevante sulla risposta del materiale finale.

In modo particolare, è opportuno sottolineare come la reologia complessiva dello stesso segue il comportamento del legante, tant'è che per piccole variazioni del contenuto di bitume, così come della percentuale di *filler*, si ottengono scostamenti significativi della resistenza del materiale.

3.1 Proprietà fisiche e meccaniche degli aggregati

Si diceva poc'anzi come uno dei due elementi che nel loro complesso costituiscono il conglomerato bituminoso siano gli aggregati.

Come si avrà modo di dire più avanti la scelta dell'aggregato da impiegare nella realizzazione del conglomerato è fondamentale poiché esso, qualsiasi esso sia, costituirà lo scheletro della pavimentazione e, pertanto, dovrà essere in grado di sostenere carichi e sollecitazioni che su di esso graveranno.

Le plurime caratteristiche insite negli aggregati necessitano di essere accuratamente studiate e, a tal fine, per chiarezza espositiva, si è ritenuto opportuno dedicare ad ogni proprietà un singolo paragrafo. Attraverso tale articolazione si è ritenuto di poter trattare, con maggior linearità, gli aggregati distinguendoli tanto per le loro caratteristiche, quanto per la moltitudine di procedure, esistenti in letteratura, attraverso le quali queste possono essere studiate.

In via preliminare, occorre, dare atto della vasta gamma di aggregati che esistono e che possono essere utilizzati per la realizzazione di un conglomerato bituminoso.

Nell'alveo di questa è possibile operare una prima forma di differenziazione degli aggregati che vede gli stessi classificarsi a seconda della loro origine ovvero della struttura che li caratterizza.

Per quanto concerne il primo dei suddetti criteri, gli aggregati si distinguono, a seconda della natura dalla quale originano e, in particolare, avremo:[6]

- Aggregati naturali (estratti da fiumi o depositi glaciali che vengono utilizzati senza ulteriori trattamenti);
- Aggregati naturali trattati (sottoposti a trattamenti come lavaggio, separazione di frazioni granulometriche e frantumazione);
- Aggregati artificiali prodotti industrialmente (es. scorie d'altoforno);
- Aggregati derivati dai prodotti di scarto delle pavimentazioni rigenerate (RAP).

Per completezza occorre sottolineare come, in realtà, questi appena descritti rappresentino gli aggregati che comunemente possono essere utilizzati nella composizione di un conglomerato; ma, al fine di migliorare le prestazioni della miscela, è possibile introdurvi anche altri tipi di materiali, quali ad esempio frammenti di pneumatici e di vetro (che sono tra i prodotti di scarto più conosciuti).

Senza trascurare, ovviamente, altri fattori che possono influenzare i criteri di scelta, quali economicità, impatto ambientale e disponibilità di reperimento di un determinato aggregato nel territorio, la scelta della tipologia di aggregato che andrà a costituire il conglomerato nel suo complesso è fondamentale poiché, come si diceva inizialmente, è dalla natura di questi che dipenderanno, di conseguenza, le proprietà del conglomerato stesso.

Gli aggregati possono essere classificati in base alla struttura dei grani e in questo caso avremo: *aggregati a spigoli vivi* e *aggregati arrotondati* con superficie liscia.

I primi presentano delle caratteristiche meccaniche superiori rispetto ai secondi; prova ne è che, a parità di resistenza intrinseca, in

una miscela di aggregati a spigoli vivi, i singoli grani si mescolano tra di loro a formare una massa compatta, mentre in una miscela di aggregati arrotondati, invece, i singoli grani tendono a scivolare uno sull'altro.Vengono riportate in Figura 3-1 due immagini raffiguranti le diverse strutture che possono connaturare gli aggregati.

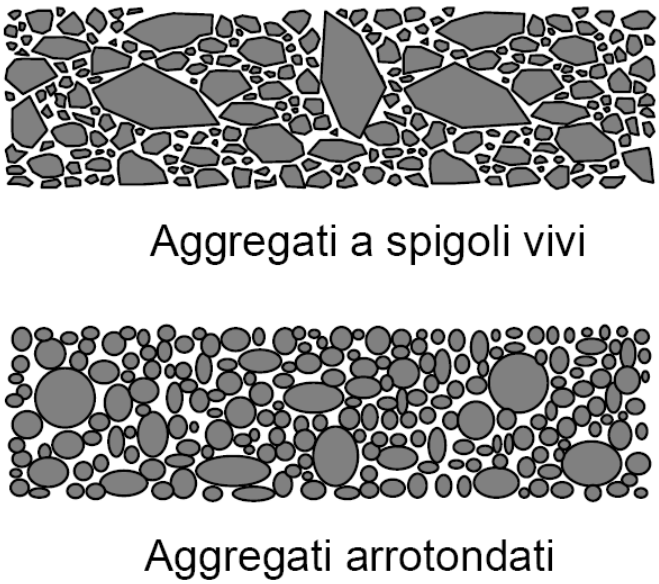


Figura 3-1 - Confronto tra aggregati a spigoli vivi e arrotondati

Così come per la natura del singolo aggregato, anche la scelta della struttura è fondamentale e assume particolare rilievo soprattutto nel momento in cui il materiale è sottoposto a carichi pesanti e ripetuti nel tempo. Nel momento in cui, infatti, una miscela di aggregati viene sottoposta ad un carico crescente, superato un certo limite, si viene a creare una superficie di scorrimento che provoca delle deformazioni permanenti. Ciò avviene, in particolare, quando lo sforzo di taglio supera la resistenza al taglio del materiale.

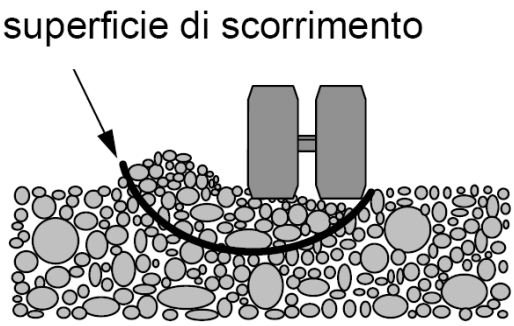


Figura 3-2 – Superficie di scorrimento a rottura

La resistenza al taglio è superiore per gli aggregati a spigoli vivi. A dimostrazione di ciò si riporta l'esperienza di seguito descritta e rappresentata in Figura 3-3: si prendano due masse di aggregati, la prima costituita da grani a spigoli vivi e la seconda da grani arrotondati, disponendo a mucchio entrambi i materiali, si nota che l'aggregato cubico forma un angolo di riposo superiore rispetto all'aggregato arrotondato.

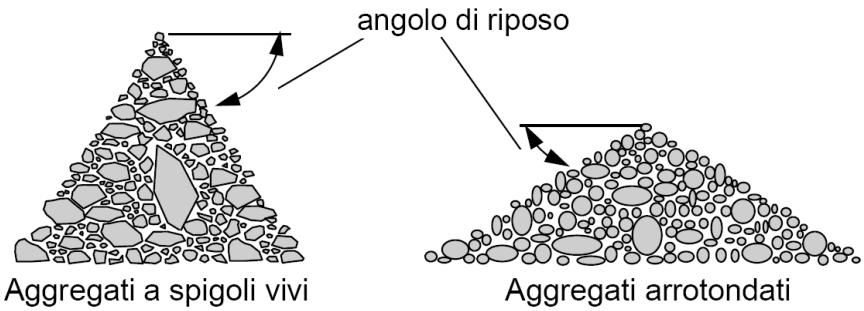


Figura 3-3 – Angolo di riposo di aggregati a spigoli vivi e arrotondati

Il comportamento al taglio di un aggregato è ben descritto dalla teoria di Mohr-Coulomb, la quale stabilisce che la resistenza al taglio si compone di due aliquote: una di natura coesiva, che prende il nome di *coesione* e viene indicata con "c", ed una di natura attritiva che dipende dall'*angolo di resistenza al taglio*, indicato con ϕ e dalla tensione normale σ cui è soggetto il materiale. Questi elementi sono collegati tra loro con la seguente espressione:

$$\tau = c + \sigma \times tan\,\varphi \qquad (3\text{-}1)$$

Graficamente, nel piano di Mohr-Coulomb la suddetta legge rappresenta una retta che intercetta l'asse delle ordinate per un valore di σ pari al contributo fornito dalla coesione "*c*" ed ha una pendenza pari all'angolo di resistenza al taglio del terreno ϕ.

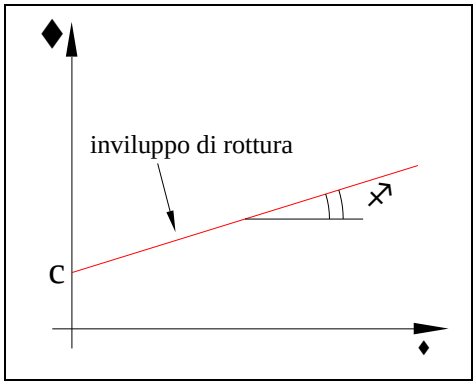


Figura 3-4 –Legge di Mohr-Coulomb

Per un aggregato naturale, infine, la componente coesiva è alquanto piccola; per cui la resistenza al taglio dipende essenzialmente dalla componente attritiva, la quale ci indica la capacità che il materiale ha di collegare i singoli grani tra di loro quando è sottoposto ad una tensione normale.

L'obiettivo finale è determinare, per una miscela granulometrica, le condizioni che consentano di aumentare l'attrito interno alla stessa, la quale sarà, a questo punto, essenzialmente composta da elementi frantumati con un basso quantitativo di sabbia.

Al fine di sviluppare uno strumento che desse la possibilità a progettisti e imprese di ottenere delle pavimentazioni migliori in termini di durata e comportamento a temperature estreme e sotto carichi pesanti, fu creato dal Congresso degli Stati Uniti nel 1987 lo Strategic Highway Research Program (SHRP), la cui normativa classifica le proprietà in funzione del livello di traffico espresso in ESAL (carico equivalente per asse).

Il sub-sistema SHRP si caratterizza principalmente per il tentativo di teorizzazione, e successiva elaborazione, di una struttura concettuale organica a supporto dell'individuazione della curva granulometrica ottimale.

Le proprietà che l'aggregato deve avere, assumono un ruolo di fondamentale importanza nei confronti delle deformazioni

permanenti, a differenza di quanto accade per la rottura a fatica e per quella a bassa temperatura che dipendono meno dall'aggregato.

Le due categorie di proprietà sono riportate nella Tabella 3-1:

Tabella 3-1 - Prove sulle proprietà effettuate sugli aggregati

Proprietà di accettazione	**Proprietà di provenienza**
Angolarità dell'aggregato grosso	Durezza
Angolarità dell'aggregato fine	Solidità
Particelle piatte, allungate e contenuto di argilla	Contenuto di materiali deleteri

Nel sistema Superpave è possibile distinguere, inoltre, due classi di proprietà degli aggregati: *proprietà di accettazione* (le cui caratteristiche peculiari sono: angolarità dell'aggregato grosso; angolarità dell'aggregato fine; particelle piatte, allungate e contenuto di argilla) e *proprietà di provenienza* (che si caratterizzano per durezza; solidità; contenuto di materiali deleteri).

Occorre, in conclusione, dare conto di un nuovo progetto, tutt'oggi ancora in fase di studio che ha ad oggetto la granulometria del materiale e che prende il nome di *Progetto della Struttura dell'aggregato*.

3.1.1 Proprietà di accettazione

Premesso che, come è stato più volte sottolineato, lo scopo dei ricercatori è garantire, anche in condizioni critiche, delle buone performance dell'HMA, le proprietà di accettazione degli aggregati, influenzando le caratteristiche meccaniche della pavimentazione, assumono un ruolo fondamentale.

Per garantire una buona progettazione occorre, inoltre, assicurare determinati standard qualitativi, i quali però, dipendendo fisiologicamente da elementi variabili (quali il livello di traffico cui la pavimentazione è destinata e la posizione dentro la struttura della pavimentazione), non sono uniformi.

Per questi motivi gli aggregati situati negli strati superficiali della pavimentazione, e per questo soggetti ad elevati stress da traffico, richiedono standard di accettazione più rigorosi che, generalmente,

vengono eseguiti sulle miscele di aggregati e non sui singoli componenti, sebbene l'applicazione ai singoli componenti consenta di scartare le frazioni non idonee.

Si accennava già come le caratteristiche peculiari delle proprietà di accettazione sono angolarità dell'aggregato grosso, angolarità dell'aggregato fine e particelle piatte, allungate e contenuto di argilla. Nei paragrafi seguenti verranno rappresentate, per ognuna di esse, le procedure di calcolo utilizzate in laboratorio attraverso le quali è possibile risalire alle singole caratteristiche e, in funzione dei risultati ottenuti, individuare la tipologia di aggregato da adottare a seconda delle esigenze richieste dalla pavimentazione stradale realizzata.

Angolarità dell'aggregato grosso

L'angolarità dell'aggregato grosso, definita come *la percentuale in peso di aggregati di dimensioni superiori a 4,75 mm con una o più facce fratturate*, è sinonimo del grado di attrito interno e della resistenza all'ormaiamento.

Figura 3-5 – Valutazione facce fratturate

La procedura volta a misurare l'angolarità degli aggregati grossi è normata all'ASTM D 5821 e, al fine di poter determinare una faccia fratturata, include il conteggio manuale delle particelle.

Per "faccia fratturata", in particolare, si intende quella superficie con un contorno netto (fratturata appunto) che, nel suo complesso,

occupa più del 25% dell'area del contorno della parte visibile dell'aggregato.

Occorre sottolineare come, anche in questo caso, subentreranno ulteriori parametri che contribuiranno alla determinazione del valore minimo richiesto per l'angolarità degli aggregati grossi: il livello di traffico e la posizione all'interno la struttura della pavimentazione.

Tali requisiti, riportati in Tabella 3-2, vengono applicati alla miscela di aggregati finale, sebbene le valutazioni siano fatte sui singoli aggregati.

Tabella 3-2 - Requisiti Superpave di Angolarità dell'aggregato grosso

Livello di traffico (milioni di ESALs)	Percentuale minima Profondità dalla superficie	
	< 100 mm	> 100 mm
< 0.3	55/-	-/-
da 0.3 a 3	75/-	50/-
da 3 a 10	85/80	60/-
da 10 a 30	95/90	80/75
≥ 30	100/100	100/100

Angolarità dell'aggregato fine

L'angolarità dell'aggregato fine è *la percentuale dei vuoti d'aria presenti in aggregati approssimativamente addensati più piccoli di 2.36 mm.* Come la precedente, anch'essa è indice di garanzia di un elevato grado di attrito interno e di resistenza all'inormaiamento e, per misurare tale proprietà, la procedura da applicare è specificata nell'AASHTO T 304.

In particolare, come rappresentato in Figura 3-6, la prova consiste nel versare un campione di aggregato fine in un piccolo cilindro graduato che scorre attraverso un imbuto.

Dalla determinazione del peso di aggregato fine (W) nel cilindro pieno, di volume noto (V), si calcolano i vuoti come la differenza tra il volume del cilindro e il volume di aggregato fine contenuto nel cilindro, dove il volume dell'aggregato fine viene calcolato conoscendo il suo peso per unità di volume (Gsb).

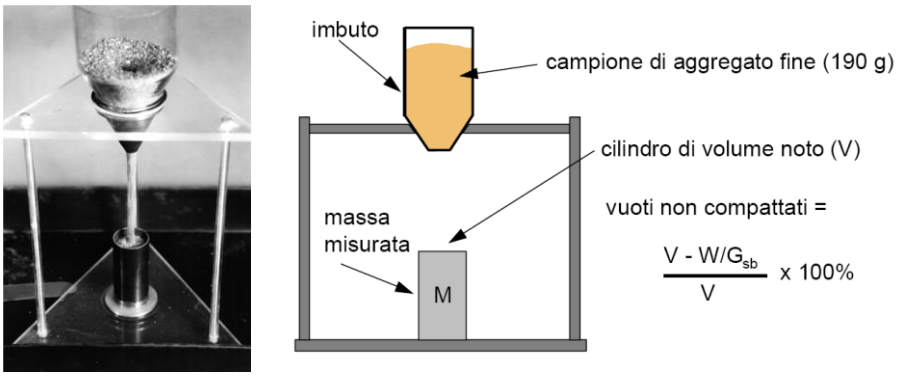


Figura 3-6 - Angolarità dell'aggregato fine

Anche in questo caso, come specificato nel precedente paragrafo, i requisiti minimi richiesti sono in funzione del livello di traffico e della posizione all'interno della pavimentazione, come mostra la Tabella 3-3. Si noti che i criteri sono definiti come la percentuale dei vuoti d'aria in aggregato fine approssimativamente addensato.

Tabella 3-3 - Requisiti Superpave di Angolarità dell'aggregato fine

Livello di traffico (milioni di ESALs)	Percentuale minima	
	Profondità dalla superficie	
	< 100 mm	> 100 mm
< 0.3	-	-
da 0.3 a 3	40	40
da 3 a 10	45	40
da 10 a 30	45	40
≥ 30	45	45

Particelle piatte e allungate

Questa caratteristica rappresenta la percentuale in peso di un aggregato grosso che abbia un rapporto, tra la dimensione massima e minima, superiore a cinque.

Tale forma di particelle rappresenta una tipologia non particolarmente desiderata nella composizione della miscela a causa della registrata tendenza a rompersi durante la fase di costruzione della pavimentazione e in fase di carico.

La procedura utilizzata, in questo caso, è ASTM D 4791 ed è eseguita su un aggregato di dimensioni superiori a 4.75 mm. Per eseguire la misurazione si adotta un particolare calibro utile a

determinare il rapporto delle dimensioni di un campione di aggregati rappresentativo.

L'aggregato è inizialmente posto con le sue dimensioni maggiori tra un braccio oscillante e un punto A fissato; successivamente si blocca il dispositivo e l'aggregato si pone tra l'altra estremità del braccio e un punto B fissata. Solo nel caso in cui l'aggregato riesca a passare attraverso questo gap, può essere considerato una particella piatta o allungata.

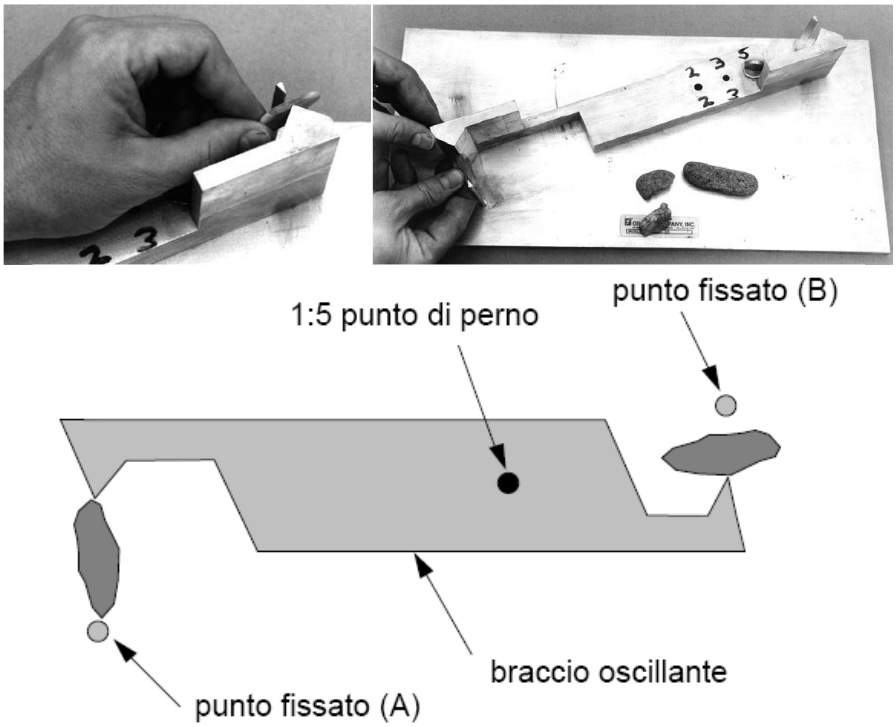


Figura 3-7 – Schema dello strumento di misura delle particelle piatte e allungate

I requisiti minimi richiesti sono indicati in funzione del livello di traffico come mostra la Tabella 3-4. Si noti che i criteri sono definiti come la percentuale massima in peso di particelle piatte e allungate.

Tabella 3-4 - Requisiti Superpave per particelle piatte e allungate

Livello di traffico (milioni di ESALs)	Percentuale massima
< 0.3	-
da 0.3 a 3	10
da 3 a 10	10
da 10 a 30	10
≥ 30	10

Essi vengono applicati alla miscela di aggregati finali, sebbene le valutazioni siano effettuate sulle singole particelle.

Contenuto di argilla

Il contenuto di argilla è quella porzione, misurata in percentuale, di materiale contenuta nella frazione di aggregato che riesce a passare attraverso il setaccio di misura pari a 4.75 mm.

La misurazione è effettuata in base all'AASHTO T 176 ed è effettuata secondo la seguente procedura: un campione di aggregato fine è inserito in un cilindro graduato, come rappresentato in Figura 3-8, con una soluzione flocculante e viene agitato per slegare l'argilla presente in esso ricoprendo l'aggregato. La soluzione flocculante preme, così, sul materiale argilloso il quale, a sua volta, si pone in sospensione sull'aggregato granulare. A sedimentazione conclusa, nel cilindro graduato, avremo questo tipo di dislocazione: in fondo si disporrà la sabbia, subito sopra la frazione argillosa e, infine, sul sito superiore, la soluzione flocculante.

Il valore dell'equivalente in sabbia è calcolato come il rapporto tra l'altezza della sabbia e quella dell'argilla espressa in percentuale.

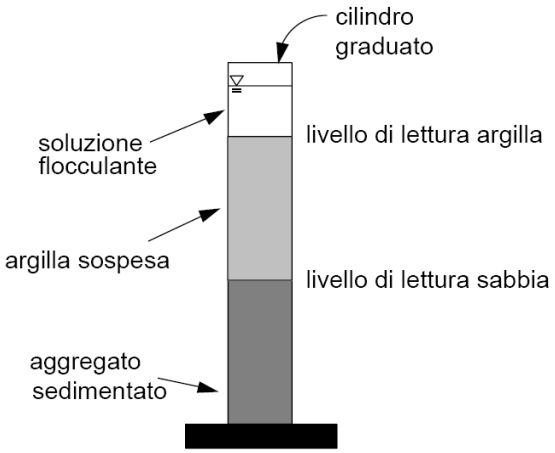


Figura 3-8 - Determinazione dell'equivalenza in sabbia

Come illustrato nella Tabella 3-5, i requisiti Superpave sono espressi come il contenuto minimo di equivalente in sabbia, in funzione del livello di traffico.

Come per le altre prove, infine, vale la regola per cui i requisiti sono applicati alla miscela finale, sebbene le valutazioni siano effettuate sui singoli aggregati.

Tabella 3-5 - Requisiti Superpave per il contenuto di argilla

Livello di traffico (milioni di ESALs)	Contenuto equivalente in sabbia minimo (%)
< 0.3	40
da 0.3 a 3	40
da 3 a 10	45
da 10 a 30	45
≥ 30	50

3.1.2 Proprietà di provenienza

Gli aggregati possono essere classificati anche in funzione della loro "provenienza". Tale proprietà è, infatti, utilizzata dai ricercatori parallelamente alle proprietà di accettazione, i quali, dunque, arrivano a definire le cd. "*proprietà di provenienza degli aggregati*".

Queste ultime assumono un ruolo fondamentale, in particolare, durante la fase di mix design della miscela e durante la fase di controllo.

Durezza

La durezza è una proprietà degli aggregati che consente di definire la resistenza alla degradazione del materiale lapideo qualora questo sia sottoposto ad azioni meccaniche.

La sua valutazione è effettuata utilizzando la prova Los Angeles, attraverso la quale è misurata la perdita in peso per frantumazione di una miscela di aggregato di dimensioni superiori a 2.36 mm. La procedura è standardizzata nell'AASHTO T 96.

L'aggregato inserito nel dispositivo è sottoposto contestualmente a rotazione ed urto con sfere metalliche (carica abrasiva). Il risultato del test è espresso come la percentuale di perdita in peso del materiale durante il test.

$$L.A.(\%) = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \qquad (3\text{-}2)$$

dove:

- P1 = massa iniziale del campione di prova;
- P2 = massa del trattenuto al setaccio da 1,68 mm dopo la prova.

Figura 3-9 - macchina Los Angeles.

Il range di valori tipici di perdita in peso, all'incirca, oscilla tra il 35% e il 45%.

Solubilità

La procedura con la quale si ricava tale parametro è descritta nell'AASHTOO 104. La solubilità è definita come la perdita in peso, espressa in percentuale, di una miscela di aggregati a conclusione della prova. Il test, che può essere eseguito sia su aggregati grossi sia fini, stima la resistenza dell'aggregato all'erosione simulando le condizioni di lavoro ed è eseguito esponendo un campione di aggregato alla ripetuta immersione in soluzione satura di solfato di sodio o di magnesio.

Ogni immersione è seguita da un'essiccazione in forno che costituisce un ciclo di solubilità, durante la fase di essiccazione il sale precipita dalle parti permeabili dell'aggregato, mentre dopo la re-immersione il sale si re-idrata ed esercita delle azioni interne dilatanti che simulano le azioni dilatanti del gelo.

Il risultato del test è espresso come la perdita in percento totale sui vari intervalli di setaccio per un determinato numero di cicli.

Il range dei valori tipici, in questo caso, va dal 10% al 20% per 5 cicli.

Materiali Deleteri

I materiali deleteri sono definiti come la quantità in peso, espressa in percentuale, di componenti contaminanti come scisti, legno, mica, carbone, nelle miscele di aggregati. Il test, normato dall'AASHTOO T 112, può essere effettuato sia su materiale grosso, sia su materiale fine ed è eseguito con un materiale setacciato umido trattenuto dal setaccio prescritto. Il risultato è rappresentato dal quantitativo di materiale perso ed è riportato come percentuali in peso di grumi di argilla e particelle friabili.

Il range di valori massimi ammissibili è abbastanza vasto oscillando dallo 0.2% al 10%. Essi dipendono dalla composizione del materiale contaminante.

3.1.3 Granulometria

Le procedure Superpave utilizzano il diagramma granulometrico "*0.45 Power*" per definire una granulometria ammissibile.

Il seguente diagramma utilizza una tecnica grafica unica al fine di giudicare la distribuzione cumulativa delle dimensioni delle particelle di una miscela di aggregati. L'ordinata del diagramma rappresenta la percentuale di passante, mentre l'ascissa, in scala aritmetica, indica le misure dei setacci in millimetri elevati alla potenza 0.45.

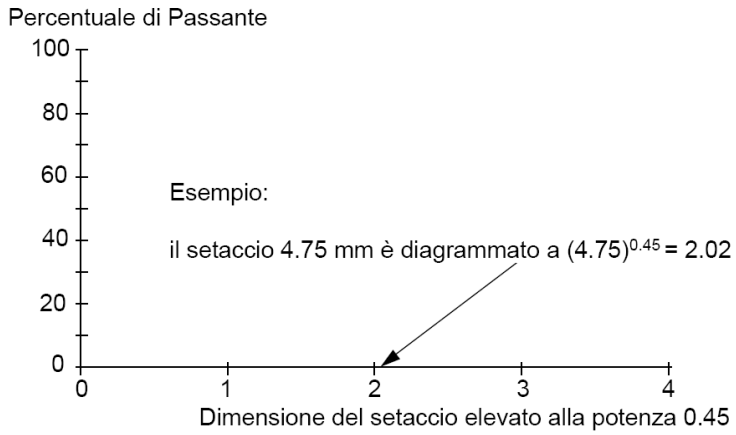


Figura 3-10 - Diagramma granulometrico "0.45 Power"

Una delle caratteristiche più importanti di questa illustrazione è rappresentata dalla capacità che essa possiede di individuare la massima densità granulometrica.

Viene, infatti, ricavato un grafico granulometrico costituito da una linea retta passante dall'origine e che, per l'appunto, rappresenta la massima densità granulometrica.

Al fine della buona riuscita della procedura è impiegato un set standard di setacci della linea ASTM, tenendo conto, in particolare, delle seguenti definizioni:

- *Grandezza massima*: dimensione del setaccio più grande della grandezza massima nominale;
- *Grandezza massima nominale*: dimensione del setaccio più grande del primo setaccio che trattiene più del 10%.

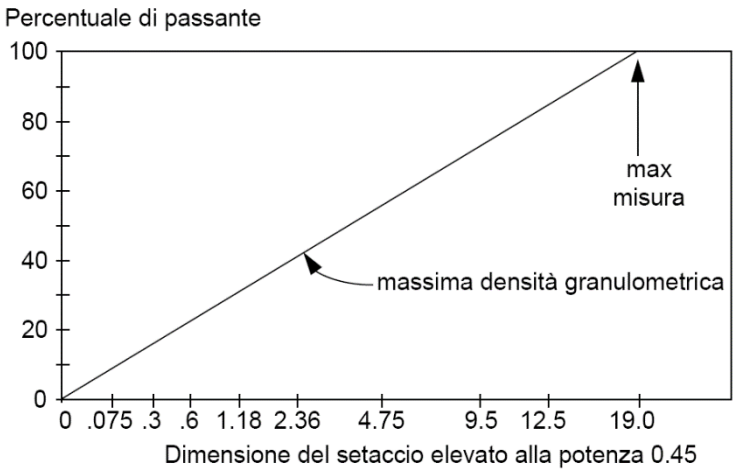


Figura 3-11 - Massima densità granulometrica

Il diagramma granulometrico 0.45 Power mostra la massima densità granulometrica per una dimensione massima di 19 mm e grandezza massima nominale pari a 12.5 mm.

La massima densità granulometrica, in particolare, indica la granulometria per la quale l'aggregato raggiunge la massima densità e rappresenta una situazione da evitare poiché, altrimenti, si andrebbero a formare taluni vuoti, molto piccoli, che non consentirebbero di sviluppare una pellicola di legante sufficientemente spessa e tale da garantire la durevolezza della miscela.

Nel digramma, inoltre, sono presenti anche delle zone caratteristiche costituite da una zona vietata e da alcuni punti di controllo.

Si individuano in particolare otto punti di controllo: due a 0.075 mm, due a 2.36 mm, uno 9.5 mm, due in corrispondenza della grandezza massima nominale e uno, infine, in corrispondenza della grandezza massima.

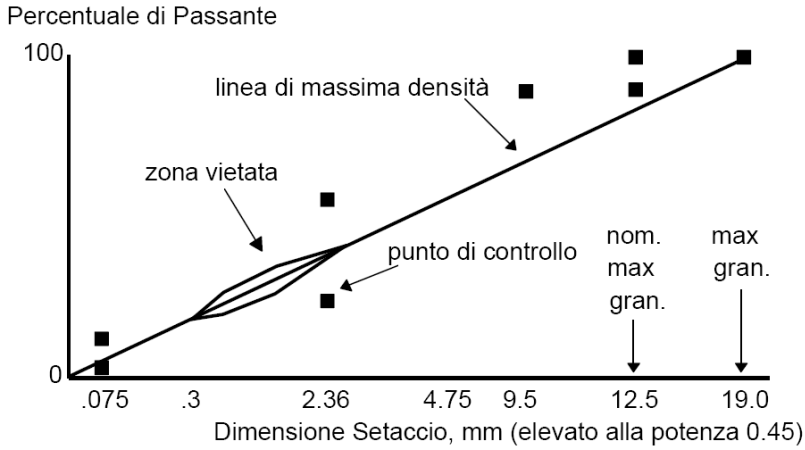


Figura 3-12 - Rappresentazione punti di controllo

La zona vietata si trova lungo la linea di massima densità tra la dimensione di setaccio intermedia (fra 4.75 e 2.36) e 0.3 mm e racchiude un'area in cui la curva granulometrica, per i motivi già detti, non deve passare.

Le granulometrie che, per converso, riescono ad oltrepassarla presentano una elevata quantità di sabbia fine e un comportamento misto caratteristico di una miscela difficile da compattare, oltre ad una ridotta resistenza alle deformazioni permanenti. Le granulometrie che passano dalla zona vietata, inoltre, possono presentare un'intelaiatura scheletrica debole che dipende molto dalla rigidezza del legante per raggiungere un'adeguata resistenza al taglio della miscela.

Tali miscele, infine, sono anche molto sensibili al contenuto di legante e possono facilmente diventare plastiche.

La frequenza cumulativa della distribuzione delle dimensioni di un particolare aggregato viene definita con il già citato "*Progetto della Struttura dell'Aggregato*".

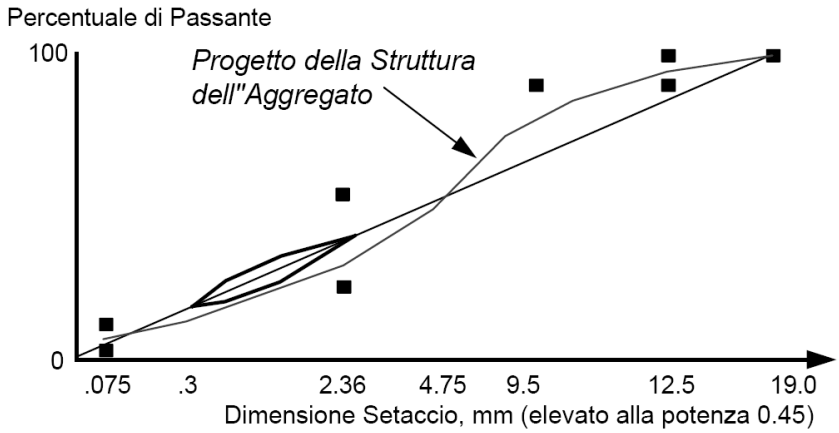


Figura 3-13 - Progetto della Struttura dell'Aggregato

Le granulometrie che seguono i requisiti Superpave evitano i punti di controllo e la zona vietata. In particolare vengono delineati cinque tipi di miscele di aggregato, definiti dalla grandezza massima nominale di un aggregato.

Tabella 3-6 - Miscele di aggregati Superpave

Miscela di Superpave	Grandezza massima nominale	Grandezza Massima (mm)
37.5 mm	37.5	50.0
25.0 mm	25.0	37.5
19.0 mm	19.0	25.0
12.5 mm	12.5	19.0
9.5 mm	9.5	12.5

Le procedure Superpave raccomandano, senza che ciò rappresenti alcun vincolo, l'utilizzo di miscele tali da essere classificate sotto la zona vietata e che, inoltre, al crescere del livello di traffico, le curve granulometriche si avvicinino ai punti di controllo inferiori dell'aggregato grosso.

Occorre da ultimo sottolineare come tali requisiti non vengano applicati a miscele speciali come conglomerati con matrici in pietrame o classi di miscele aperte.

3.2 Comportamento fisico e meccanico del legante

Il legante ha lo scopo di trattenere insieme gli aggregati di diversa forma e grandezza formando una miscela; inoltre crea una struttura compatta, resistente a trazione e durevole per riuscire a far fronte alle sollecitazioni veicolari [6].

Esistono vari tipi di leganti che si possono utilizzare nel settore delle pavimentazioni stradali e si distinguono in due grandi categorie: i leganti idraulici, definiti tali poiché sviluppano la proprietà di legare solo a seguito della reazione di idratazione con l'acqua (es. il cemento, la calce idraulica); i leganti organici che possono essere a loro volta divisi in due grandi classi: polimerici e idrocarburici.

In questa sede si concentrerà l'attenzione unicamente sui leganti organici ed in particolare sul bitume di tipo tradizionale.

Comportamento viscoelastico

Il bitume "tradizionale" è un materiale a comportamento viscoelastico, dove coesistono una componente viscosa ed una elastica: se è sottoposto a brevi tempi di carico si manifesta un comportamento di tipo elastico al contrario, se è soggetto a lunghi tempi di carico, il materiale fluisce viscosamente dando origine a deformazioni irreversibili.

Inoltre è un materiale termoplastico per cui si presenta allo stato liquido alle alte temperature, in uno stato solido-semisolido alla temperatura ambiente e in uno stato solido-fragile alle basse temperature, come rappresentato schematicamente in Figura 3-14.

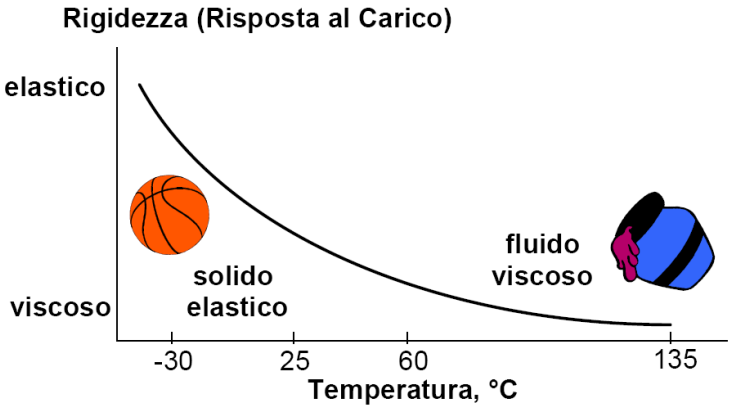


Figura 3-14 - Comportamento del bitume al variare della temperatura

Il prevalere di una caratteristica rispetto all'altra dipende sia dalla temperatura che dalla durata del carico nel tempo. Infatti, gli effetti di tempo e di temperatura sono tra di loro collegati poiché la risposta del materiale a carichi di breve durata ad alte temperature è simile a quella che si registra a basse temperature ma con tempi di applicazione dei carichi più lunghi.

Il comportamento del materiale può essere caratterizzato sia alle basse sia alle intermedie e sia, infine, anche alle alte temperature:

- A basse temperature il comportamento del bitume sotto l'effetto dei carichi è quello di un solido elastico con deformazioni completamente reversibili. Al diminuire della temperatura si manifesta un comportamento a rottura del solido di tipo fragile;
- Ad alte temperature il comportamento del bitume sotto l'effetto dei carichi è quello di un fluido viscoso, che fluisce senza fare più ritorno alla sua posizione originaria, ovvero manifesta un comportamento plastico con deformazioni irreversibili. Un effetto riscontrabile nelle pavimentazioni è caratterizzato dalla formazione di ormaie generate dal passaggio dei veicoli, tuttavia, questo fenomeno ha delle cause più profonde che dipendono anche dal mix design della miscela e dalle caratteristiche degli aggregati;
- A temperature intermedie, i bitumi mostrano le proprietà sia dei liquidi viscosi sia dei solidi elastici, ottenendo così un conglomerato a comportamento viscoelastico manifestando le sue proprietà in funzione della temperatura e dell'entità del carico.

Dalla descrizione appena illustrata si evince come il bitume mostri un'eccellente proprietà di adesione agli aggregati ma, anche, un comportamento alquanto complesso: quando è caldo, agisce come un lubrificante e favorisce la compattazione degli aggregati; dopo il raffreddamento, agisce come un adesivo che tiene uniti gli aggregati l'uno con l'altro formando una matrice solida e resistente.

Invecchiamento

La vita utile di una miscela di conglomerato bituminoso è fortemente influenzata dall'invecchiamento del legante poiché la struttura complessa del bitume, essendo un derivato del petrolio, contiene delle molecole organiche (costituite da carbonio) che reagiscono con l'ossigeno mediante un processo di ossidazione.

Il processo di invecchiamento o di "*ageing*" del legante è caratterizzato da una suscettibilità termica piuttosto elevata e, al fine di comprenderne appieno i meccanismi e le modalità termo-dipendenti derivanti dal riassestamento molecolare con cui si evolve, è tutt'ora in fase di studio. Oltre a ciò, l'invecchiamento chimico del legante è altresì determinato dall'abbinamento tra volatilizzazione delle sostanze più leggere, per un verso, e reazioni di ossidazione e di polimerizzazione delle molecole, per altro, queste ultime, inoltre, comportano delle evoluzioni irreversibili.

Tale processo degenerativo del materiale è la causa della fragilità dei conglomerati bituminosi, dovuta ad un indurimento che, però, deriva quasi esclusivamente da due fattori: dal greggio di origine e dal processo produttivo [7].

I fenomeni di *ageing* possono, in particolare, essere classificati in due fasi, in funzione di quando essi avvengono [8]:

- invecchiamento breve termine o precoce:
    - nella fase di produzione dei conglomerati bituminosi;
    - durante la fase di stesa dei conglomerati bituminosi;
- invecchiamento secondario o di lungo termine:
    - durante l'esercizio della pavimentazione.

L'invecchiamento a breve termine, in gergo anglofono "*Short-Term Ageing – STA*", dipende fortemente dalla tipologia di bitume impiegato e avviene solo nelle fasi di produzione, stesa e compattazione durante le quali il bitume si trova a temperature elevate (intorno a 160°C). Anche se il bitume è esposto alle alte temperature per una breve durata temporale, questo tipo di invecchiamento costituisce un danno per il materiale paragonabile a quello a lungo termine.

Una procedura di laboratorio per riprodurre l'invecchiamento precoce del bitume è la RTFOT "*Rolling Thin Film Oven Test*" (EN 12607 – ASTM D2872). Questa prova simula le alterazioni che subisce il bitume durante la miscelazione con gli aggregati nell'impianto di produzione, durante la stesa e la rullatura del manto stradale e consiste nel sottoporre un sottile strato di bitume (circa 1,25 mm), ad un getto d'aria calda (163°C) per 75 minuti. Inoltre la prova fornisce il campione pronto per la determinazione della perdita in peso e per le

prove che caratterizzano il bitume riguardo alla resistenza all'invecchiamento precoce.

L'invecchiamento a lungo termine, in inglese "*Long-Term Ageing – LTA*", è così chiamato poiché, interessando tutto l'arco temporale di vita utile della pavimentazione, è un processo che, potenzialmente, può durare per decenni.

Occorre, inoltre, osservare come l'invecchiamento interessi principalmente gli strati più superficiali, rispetto agli strati profondi, poiché sono i primi a risentire maggiormente degli effetti delle condizioni climatiche. La porzione epidermica della pavimentazione è, infatti, soggetta sia ad elevati sbalzi termici sia all'azione dei raggi UV che, in aggiunta alle caratteristiche fisiche della miscela, sono parametri che influiscono considerevolmente l'*ageing*. In aggiunta a questo le caratteristiche fisiche dello strato, il mix design e conseguentemente la porosità, sono parametri da tener conto durante lo studio del Long-Term Aging.

Sulla scorta di quanto sopra evidenziato è evidente come il grado di invecchiamento dipenda da una moltitudine di fattori che concorrono simultaneamente e che non sono tra di loro facilmente scindibili.

Per simulare un certo tipo di invecchiamento in laboratorio si usa la strumentazione PAV "Pressure Ageing Vessel Test" (EN 14769 – ASTM D6521) che persegue l'obiettivo di provocare nel legante un invecchiamento in 20 o 65 ore, paragonabile a quello subito in situ nell'arco di circa 5 – 10 anni.

In questa prova i campioni di bitume vengono sottoposti ad una combinazione di pressione e temperatura elevata i cui valori sono scelti in funzione delle massime condizioni raggiungibili in situ.

3.3 Proprietà fisiche e meccaniche del c.b.

Le miscele di conglomerato bituminoso possono presentare caratteristiche fisiche e meccaniche molto differenti a seconda della granulometria e della qualità dell'inerte e della qualità e quantità del legante. Il loro studio preventivo ha lo scopo di stabilire la loro composizione in rapporto alla destinazione.

La valutazione della quantità di legante da utilizzare nel conglomerato viene effettuata confezionando in laboratorio più miscele, con percentuali di bitume comprese negli intervalli generalmente prescritti dai capitolati (Tabella 3-7) ed eseguendo delle prove atte a caratterizzare la resistenza meccanica delle miscele stesse.

Le prove più utilizzate a questo fine sono le seguenti: prova Marshall e prova di trazione indiretta "brasiliana", per i conglomerati confezionati a freddo si utilizza la prova di compressione. Talvolta vengono impiegate anche prove per la determinazione delle caratteristiche elastiche viscose (modulo resiliente, complesso e creep dinamica) e della resistenza a fatica.

Tabella 3-7 - Prescrizioni relative ai conglomerati bituminosi a caldo riportate sul capitolato ANAS e sulle norme tecniche di appalto di Autostrade S.p.A.

STRATO	CAPITOLATO ANAS		N.T.A. AUTOSTRADE S.p.A	
	%bitume	%vuoti	%bitume	%vuoti
Base	3.5÷4.5	4.0÷7.0	4.0÷5.0	4.0÷7.0
Collegamento	4.0÷5.5	3.0÷7.0	4.5÷5.0	3.0÷6.0
Collegamento per ponti	-	-	5.0÷6.0	2.0÷4.0
Usura ordinaria	4.5÷6.0	3.0÷6.0	4.5÷6.0	4.0÷6.0
Usura drenante	-	-	5.0÷6.5	fuso A 16÷18 fuso B 14÷16 fuso C 12÷14
Usura per ponti	-	-	5.5÷6.5	2.0÷4.0

3.3.1 Le proprietà volumetriche della miscela

La composizione volumetrica delle miscele influenza il comportamento sia resiliente che non reversibile dei conglomerati bituminosi. Le miscele sono costituite da tre componenti: aggregati, legante e vuoti (Figura 3-15).

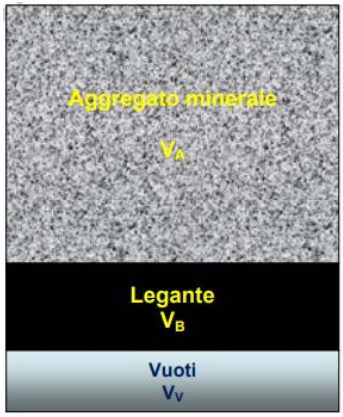


Figura 3-15 - Composizione volumetrica delle miscele di conglomerato bituminoso

Tra le grandezze che descrivono la composizione volumetrica e le caratteristiche dei componenti valgono le relazioni seguenti:

$$V_A+V_B+V_V=100 \tag{3-3}$$

$$V_B = \frac{1}{100}\frac{\frac{V_A}{100}.MVR_A.\frac{P_B}{100}}{MVR_B} = \frac{\frac{V_A}{100}.MVR_A.P_B}{MVR_B} \tag{3-4}$$

Sostituendo la prima relazione nella seconda, si ha:

$$100 - V_A - V_V = \frac{\frac{V_A}{100}\cdot MVR_A\cdot P_B}{MVR_B} \tag{3-5}$$

$$100 - V_V = V_A\left(1 + \frac{MVR_A\cdot P_B}{100\cdot MVR_B}\right) \tag{3-6}$$

$$V_A = \frac{100 - V_V}{1+\frac{MVR_A\cdot P_B}{100\cdot MVR_B}} \tag{3-7}$$

Dove:

- V_A, V_B e V_V sono rispettivamente le percentuali in volume degli aggregati, del legante e dei vuoti (%);
- MVR_A e MVR_B sono rispettivamente la massa volumica apparente degli aggregati e quella del legante (Kg/m^3);
- P_B è la percentuale in peso del legante rispetto al peso degli inerti (%).

Sulla scorta di quanto sopra, note le grandezze V_V, MVR_A, MVR_B e P_B è possibile stabilire la composizione volumetrica della miscela.

3.3.2 Le proprietà meccaniche della miscela

Il comportamento meccanico del c.b. è regolato da diversi parametri caratteristici in grado di interpretare la natura elasto-viscosa della miscela. Si riportano di seguito i principali moduli caratterizzanti il materiale.

Modulo complesso

In un materiale viscoelastico il modulo complesso descrive la relazione che si instaura tra la tensione e la deformazione. La ratio di effettuare un test sul modulo complesso è spiegata dalla necessità di indagare come i materiali delle pavimentazioni rispondono alle sollecitazioni periodiche alle varie frequenze.

In tali condizioni le caratteristiche meccaniche sono determinate in laboratorio con prove su campioni cilindrici di c.b. soggetti a sollecitazioni monoassiali, variabili con legge sinusoidale [9]. Anche la conseguente deformazione è variabile con la medesima legge e con pari frequenza tuttavia, rispetto alla sollecitazione subìta, è sfasata nel tempo di un intervallo che è funzione della frequenza del carico e diminuisce con il crescere della frequenza.

Il modulo complesso, che fu utilizzato ab origine per il solo bitume, è in altre parole, un numero complesso, interpretato graficamente in

Figura 3-16, costituito da due aliquote: una parte reale, misura del lavoro reversibile e della proprietà puramente elastica; una parte immaginaria, che ingloba in sé la componente viscosa responsabili del lavoro irreversibile.

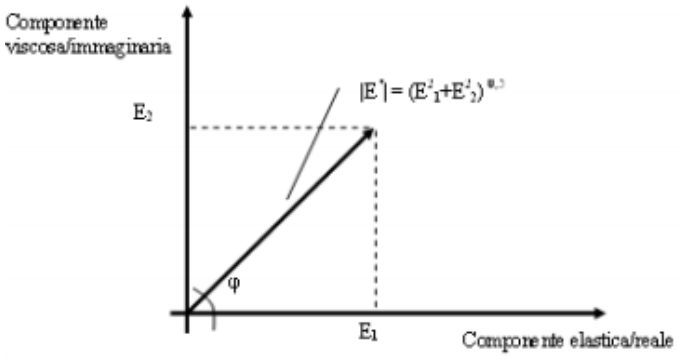


Figura 3-16 - Stress e deformazione per un carico dinamico sinusoidale[10]

La definizione in letteratura del modulo complesso per un materiale soggetto a forzante sinusoidale *F(t)* è la seguente:

$$F(t)= F_0 \, sen \, \omega t \tag{3-8}$$

$$E^*=E_1+iE_2 \tag{3-9}$$

$$E_1 = \gamma \, (F/D \cos \varphi + \mu\omega^2) \tag{3-10}$$

$$E_2 = \gamma \, (F/D \, sen \, \varphi) \tag{3-11}$$

dove $\omega=2\pi f$ è la pulsazione della forzante ed f è la relativa frequenza, γ è un fattore di forma dipendente dalle dimensioni e dalla geometria del campione, μ è fattore di massa che considera gli effetti inerziali, φ è la variazione di fase tra la tensione e la deformazione.

La (3-9) può essere espressa anche nella notazione trigonometrica o esponenziale come segue:

$$E^*=|E^*|(\cos \varphi + i \sin \varphi)=|E|e^{i\varphi} \tag{3-12}$$

Conseguentemente la tensione e la deformazione, rappresentate in Figura 3-17, al campione saranno le seguenti:

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t \tag{3-13}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin (\omega t - \varphi) \tag{3-14}$$

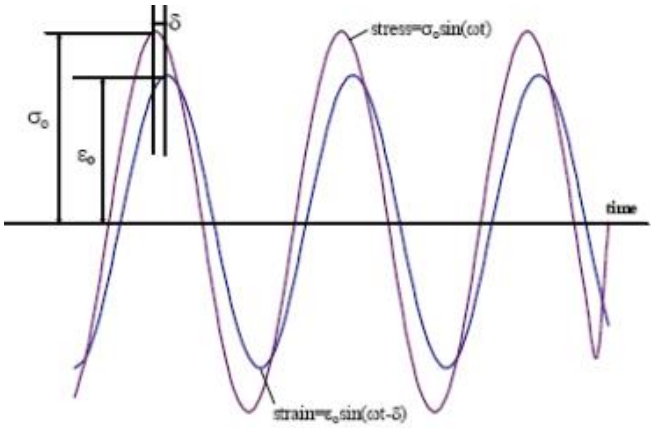


Figura 3-17 – Rappresentazione schematica tra stress e deformazione [10]

Nella normativa ASTM, il test volto alla caratterizzazione del modulo complesso deve essere condotto su un provino cilindrico soggetto ad un carico di compressione monoassiale con ampiezza sinusoidale che varia da un minimo di 30 s ad un massimo di 45 s alle temperature di 5, 25, 40 °C. Sul provino sono applicati dei trasduttori di spostamento lungo la direzione della sollecitazione per misurare la deformazione assiale.

Modulo tangente e modulo secante

Per caratterizzare il comportamento elastico di materiale il cui tratto iniziale della curva non è lineare possono essere utilizzati il modulo tangente e il modulo secante (Figura 3-18).

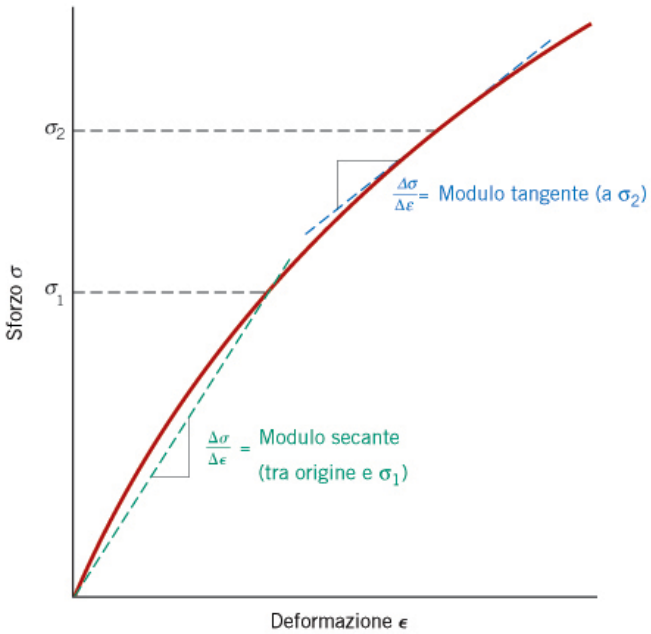


Figura 3-18 - Modulo tangente e modulo secante

Il modulo tangente è la derivata della funzione di carico tensione-deformazione misurata ad un determinato stato deformativo (pendenza della tangente alla curva ad uno specifico livello di sforzo).

Il modulo secante è il rapporto che si instaura tra la tensione e la deformazione in un dato istante di tempo t (pendenza della retta secante passante per l'origine e per un punto della curva).

Modulo resiliente

Oltre al modulo complesso, nell'ambito del programma SHRP americano, è stato introdotto il modulo resiliente al fine di disporre di un parametro che fosse in grado di fornire ulteriori caratteristiche meccaniche sul conglomerato bituminoso.

Il modulo complesso ed il modulo resiliente descrivono infatti il c.b. da due punti di vista complementari: mentre per la determinazione del primo occorre considerare una sollecitazione di compressione nel materiale come quella indotta dallo pneumatico nella zona immediatamente sottostante, per il occorre analizzare la sollecitazione di trazione indotta dalla coesione interna nel materiale adiacente a quello sottoposto a compressione. Il modulo resiliente è definito come segue:

$$M_r = \frac{\sigma}{\varepsilon_r} \tag{3-15}$$

dove σ è la tensione applicata ed ε_r è la deformazione resiliente, ovvero l'aliquota di deformazione recuperata o restituita dopo la cessazione del carico.

Nel grafico di Figura 3-19 è rappresentata la deformazione resiliente ottenuta dopo aver applicato un certo numero di cicli di carico. È interessante notare come nel c.b., trattandosi di materiale viscoelastico, dopo circa un centinaio di cicli di carico, la deformazione resiliente tende a stabilizzarsi ed a non risentire più della componente plastica di deformazione.

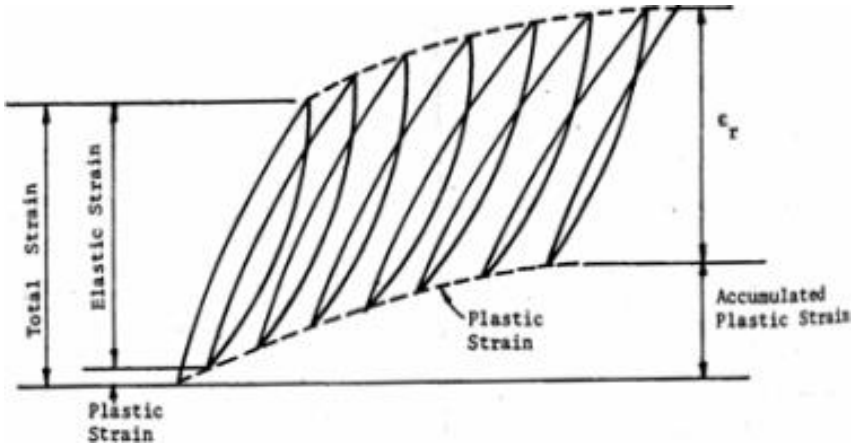


Figura 3-19 - Andamento della deformazione per un c.b. sotto un carico ripetuto [10]

La procedura di stima del modulo resiliente, regolamentata dallo standard ASTM 4123, avviene attraverso un test di trazione indiretta su un provino cilindrico in cui è applicato una sollecitazione di compressione diametrale con andamento semisinusoidale e, lungo il diametro ortogonale, è invece misurata la deformazione. Per calcolare il modulo resiliente è necessario assumere un certo valore del coefficiente di Poisson ν, stimabile confrontando la deformazione verticale e quella orizzontale; per test condotti alla temperatura di riferimento di 25°C, ν è pari circa a 0,35. Non essendo distruttivo, il test può essere ripetuto per il medesimo provino anche variandone la temperatura, il tempo di carico o l'intervallo tra due cicli successivi.

Le caratteristiche qualitative del materiale da inserire nell'analisi o nella progettazione di una sovrastruttura sono, pertanto, ben interpretabili dal modulo resiliente che può essere calibrato a seconda della circostanza progettuale. Si distinguono, inoltre, due moduli resilienti: istantaneo e totale. Il primo è calcolato utilizzando la deformazione recuperabile, appunto, istantanea, il secondo è, invece, determinato utilizzando il valore medio di deformazioni verticali e orizzontali su almeno il 75% dell'onda di deformazione.

Modulo di rigidezza

Il modulo di rigidezza, calcolato con la formula che segue, non è altro che il valore assoluto del modulo complesso ed è noto anche come modulo elastico del c.b.

$$|E^*| = \sqrt[2]{E_1^2 + E_2^2} \tag{3-16}$$

Per la stima del modulo di rigidezza è possibile utilizzare i medesimi test di laboratorio adottati per il modulo complesso.

La Norma UNI EN 12697-26 "Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Rigidezza" descrive i diversi metodi di prova e le formule per il calcolo del modulo di rigidezza.

La tipologia di prova più diffusa in Italia è quella a trazione indiretta – ITSM, che fa riferimento all'allegato C della suddetta norma. Il vantaggio che offre questo tipo di prova è dato dallo stato tensionale cui è sottoposto il provino che è biassiale e meglio rappresenta le condizioni reali di esercizio rispetto ai test a flessione. Inoltre, non

essendo una prova distruttiva, il provino rimane disponibile per eventuali altre prove quali fatica, creep, ecc. In genere, la deformazione misurata rappresenta la deformazione recuperabile e si può, pertanto, supporre che il materiale rimanga in campo elastico durante la prova. La risposta del conglomerato bituminoso ad un singolo impulso causato dal passaggio di una ruota è, infatti, quasi totalmente recuperata, ovvero la deformazione plastica conseguente alla tensione applicata, assume una grandezza trascurabile ignorata nella misurazione.

3.4 Il progetto della miscela

Il progetto di una miscela bituminosa ha come obiettivo il raggiungimento di determinati standard prescrittivi o prestazionali del prodotto finito. Vero è che l'incremento delle caratteristiche meccaniche dei singoli materiali (quali componenti della miscela), svolge un ruolo abbastanza importante al fine di massimizzarne la resistenza strutturale dell'insieme, tuttavia, altrettanto vero è che lo studio del "mix design" ottimizza l'impiego dei materiali stessi, risultando certamente più utile e sensibile da un punto di vista ingegneristico.

Con questo termine si intende letteralmente il "progetto della miscela", ovvero la scelta ed il calcolo della sua composizione in considerazione delle proprietà ingegneristiche del materiale confezionato, delle esigenze esecutive e della disponibilità di materie prime.

La reologia globale del c.b. segue generalmente il comportamento del legante e, in particolare, è noto che un suo incremento influisce positivamente sulla resistenza a trazione della miscela ma, tuttavia, come rovescio della medaglia, un suo eccesso favorisce l'accumulo di deformazioni permanenti. Oltretutto, l'eccesso di legante, trasudando sulla superficie stradale, è determinante anche per la sicurezza della circolazione, poiché comporta un abbattimento drastico del coefficiente di aderenza in condizioni di pioggia. Un giusto compromesso costituisce l'optimum: un quantitativo tale da essere, al

contempo, sufficiente e non sovrabbondante, al fine di scongiurare così il rischio di qualsiasi negativa conseguenza.

Sulla scorta delle su esposte considerazioni, si spiega come pur alla presenza delle medesime sollecitazioni esterne (siano esse dovute al traffico ovvero alle condizioni climatiche), i conglomerati bituminosi confezionati con leggere differenze (ad esempio in termini di percentuale di bitume) manifestano molto diversamente la loro risposta nei confronti del fenomeno della fatica. Così, è ovvio che la scelta del tipo di aggregato, del legante bituminoso e di eventuali additivi risulta fondamentale, poiché incide nettamente sul conglomerato facendone potenzialmente variare la risposta.

Da un punto di vista pratico, il mix-design è ottenuto con lo scopo di massimizzare il rapporto qualità/prezzo del materiale.

Anche per i conglomerati è confermato il carattere tendenzialmente a-prestazionale dei sistemi tradizionali di caratterizzazione e progetto sia per il metodo Marshall e sia per i sistemi meno diffusi come il metodo Hveem e la compressione semplice.

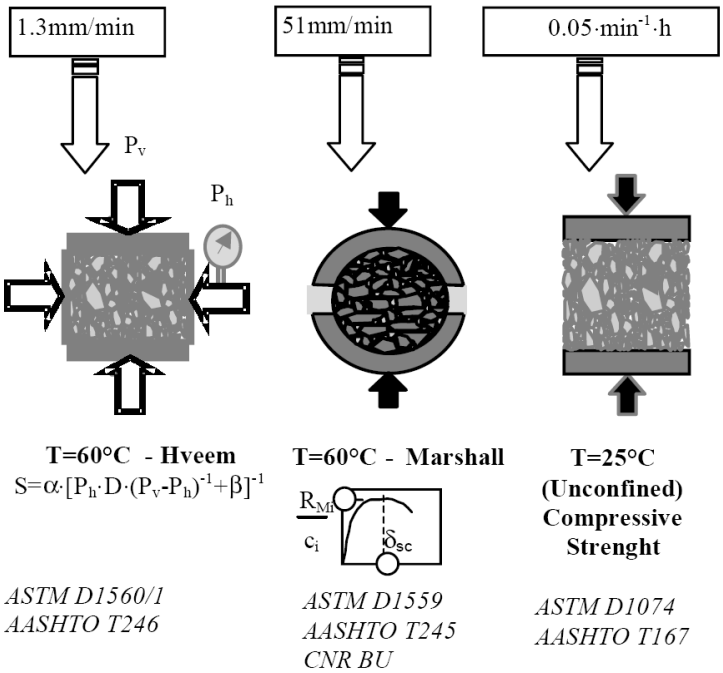


Figura 3-20 - Hveem, Marshall e Compressione Semplice[6]

Come già esposto in precedenza, il c.b. è un materiale costituito da due fasi aventi caratteristiche fisiche e meccaniche molto diverse tra di loro: aggregati e bitume. Ad esse si aggiunge una terza fase, costituita dai vuoti residui, che dipende sostanzialmente dalle caratteristiche prime due fasi e dalle modalità di confezionamento del materiale.

Per quanto concerne lo studio delle interazioni tra le diverse fasi che costituiscono la miscela, il quale è direttamente correlato all'esame dei fattori determinanti nel progetto della miscela stessa, non esiste un univoco orientamento nella materia. Per converso, sono due le scuole di pensiero che sembrano oggi scindersi il campo di ricerca: una prettamente teorica, il cui intento è interpretare il comportamento del materiale mediante modellazione dei legami costitutivi e micro-simulazioni numeriche, cui far seguire solo successivamente una validazione sperimentale; l'altra, prediligendo a contrario la sperimentazione, valuta empiricamente l'interazione tra le diverse fasi che costituiscono il conglomerato bituminoso eseguendo test di laboratorio monitorati opportunamente.

Rinviando al capitolo 3.5 una trattazione esaustiva delle suddette metodologie, in tale sede è possibile affermare come la prestazione della miscela in opera sia condizionata dalla distribuzione granulometrica degli aggregati e, altresì, dalla forma degli stessi, rappresentando questi tutti fattori che, oltre ad avere un'incidenza notevole sulla resistenza complessiva del c.b. ai vari fenomeni di degrado strutturale, influiscono notevolmente sull'efficacia della compattazione.

Nello specifico, a titolo esemplificativo, gli aggregati di frantumazione, che presentano sfaccettature nette, contrastano meglio la propagazione della frattura rispetto ad aggregati con spigoli arrotondati ma, al contempo, sono meno facilmente compattabili e, pertanto, conducono spesso ad una percentuale dei vuoti maggiore rispetto ad aggregati con forme più arrotondate.

Tra i materiali lapidei, anche la presenza di *filler* risulta fondamentale, tant'è che per piccole sue variazioni in percentuale (relazionate al contenuto di bitume) si ottengono scostamenti significativi della resistenza del materiale. Generalmente, infatti, un

incremento di filler migliora la resistenza a fatica e, allo stesso tempo, una variazione del suo contenuto ha minori effetti di quella del bitume.

Il bitume, infatti, consente alla miscela di resistere a trazione, tuttavia, se in eccesso, favorisce l'accumulo di deformazioni permanenti, unitamente al fenomeno del *bleeding*.

Allo stesso modo, le variabili fisiche delle miscele in esercizio, dipendenti soprattutto dalle modalità di posa in opera, influiscono nettamente sulla capacità che il c.b. stesso ha di resistere alle tensioni cui è soggetto senza fessurarsi.

Pertanto, parametri come il volume dei vuoti o il peso di volume del conglomerato compattato, sono elementi che incidono direttamente sulla resistenza a fatica.

Alla luce di queste ultimi considerazioni e consapevoli dell'importanza di ogni singolo elemento al fine di un risultato prossimo alla perfezione, nell'esecuzione dell'attività di ricerca l'obiettivo è quello di non trascurare nessuno di questi, valorizzandone al meglio i lati positivi, al fine di determinare delle nuove correlazioni con fattori ignorati nei modelli da precedenti studiosi.

3.4.1 Metodo Marshall

Nella progettazione dell'HMA il metodo classico, e anche il più utilizzato, è il Marshall Mix-Design, sviluppato da Bruce Marshall del Mississipi State Highway Department e, successivamente, perfezionato dallo U.S. Army Corps of Engineneers. La procedura è normata alle ASTM D 1559 e AASHTO T 245 negli USA e ad apposito B.U. C.N.R. in Italia.

L'apparecchiatura (Figura 3-21a) è abbastanza complessa e può essere rappresentata nei seguenti termini: un gruppo di misura è sostenuto da una traversa e da due colonne; sono presenti un piatto sollevato a velocità costante da un motore elettrico, un martinetto meccanico e un gruppo motoriduttore e, infine, le colonne filettate e i dadi di bloccaggio consentono di variare la luce verticale. Sono, altresì, presenti un interruttore magneto-termico, un manipolatore per la salita/discesa del piatto di prova, microinteruttori di fine corsa del martinetto ed arresti di sicurezza per lo strumento di misura del carico

e la morsa. Quattro piedini di livellamento, infine, permettono il posizionamento perfetto dell'apparecchiatura.

a) *b)*

Figura 3-21 – a) Apparato Marshall; b) Testa di rottura

La macchina è dotata della "testa di rottura" (Figura 3-21b), all'interno della quale è inserito il provino, e dell'"anello dinamometrico" (Figura 3-22a), necessario per rilevare il valore del carico applicato, che può essere sostituito, alternativamente, con una cella di carico elettronica (Figura 3-22b) abbinata ad un sistema di acquisizione e visualizzazione

a) *b)*

Figura 3-22 – a) Anelli dinamometrici; b) Cella di carico elettronica

La prova permette di effettuare un'analisi di stabilità/scorrimento, consentendo la determinazione della percentuale ottima di legante da aggiungere alla miscela. La stabilità è fornita dal carico massimo raggiunto durante la prova (espressa in N), mentre la deformazione misura lo scorrimento (espresso in mm). La rottura del provino avviene a seguito del carico applicato in direzione normale al suo asse.

Il rapporto tra la stabilità e lo scorrimento prende il nome di **rigidezza Marshall**. Il legame tipico che sussiste tra le deformazioni subite dal provino e il carico applicato segue la legge di un materiale a comportamento duttile, come mostrato in Figura 3-23.

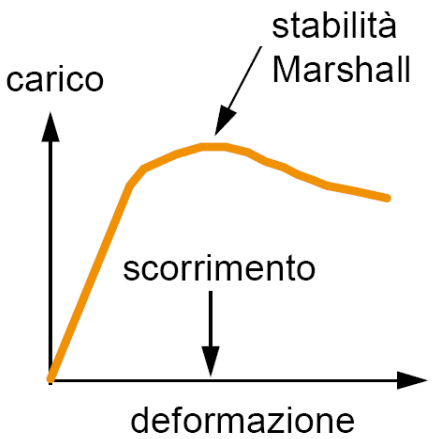


Figura 3-23 - Curva carico-deformazione tipica di una prova Marshall

I risultati della prova hanno una duplice funzione: da un lato permettono di eseguire un controllo della qualità del conglomerato durante la stesa, dall'altro, consentono di determinare la giusta quantità di bitume da aggiungere ad una determinata miscela di inerti.

Tali risultati si ottengono eseguendo la prova su provini contenenti lo stesso tipo di aggregato ma con diverse percentuali di bitumi.

Volendo riportare i risultati così ottenuti in un diagramma, in cui l'asse delle ascisse rappresenta la percentuale di bitume utilizzata e nell'asse delle ordinate è rappresentata la stabilità, si ottiene una curva a campana il cui massimo rappresenta la quantità di bitume ottima.

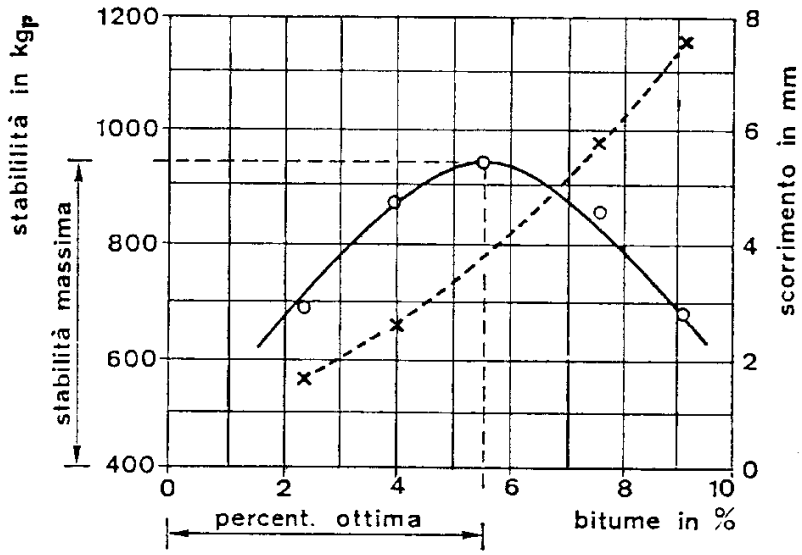


Figura 3-24 - Legame stabilità/scorrimento-percentuale di bitume

I dettagli procedurali hanno diverse formulazioni che sono contenute nei vari Capitolati Speciali d'Appalto e prevedono i seguenti passi fondamentali:

1. Scelta degli aggregati in base ai test;
2. Scelta del bitume in base a test ed individuazione delle temperature di miscelazione in relazione a diagrammi aventi un legame semilogaritmico tra la viscosità η e la temperatura T (con b<0):

$$log\,\eta = a + b \cdot T \tag{3-17}$$

3. Scelta del numero di colpi del pestello (per la costipazione del provino durante la preparazione), R_{min}, δ_{min}, δ_{max}, V_{amin}, Va_{max}, in funzione del livello di traffico;
4. Scelta del VMA_{min} (Vuoti minimi negli Aggregati Minerali) in base ad un diagramma del tipo:

$$log(VMA_{1_{min}}) \tag{3-18}$$

Con N.M.A.S. si indica la Dimensione Massima Nominale dell'Aggregato, mentre $b_1<0$ (la condizione $VMA<VMA_{min}$ può corrispondere ad una deficienza di bitume e volume di vuoti residui);

5. Scelta di VFA_{min} e VFA_{max} in base a prescrizioni di capitolato.

La determinazione della percentuale di bitume ottima b_{ott} discende dalla funzione obiettivo basata su una serie di vincoli dove, per ciascuno dei quali, corrisponde formalmente un range (b_i, b_{i+1}). Tali vincoli sono espressi nei diagrammi sottostanti.

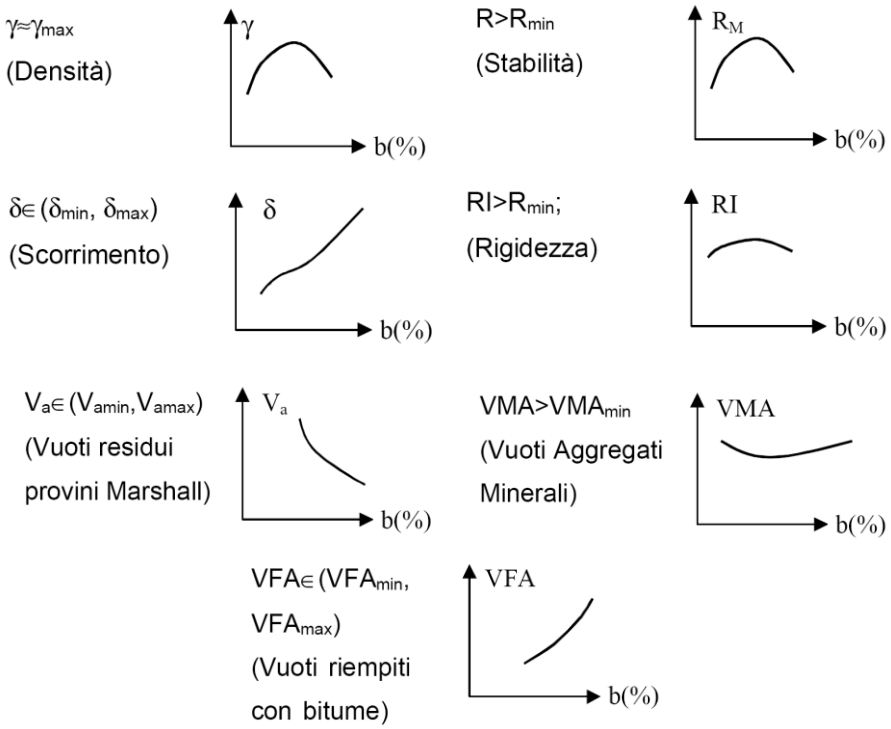


Figura 3-25 – Relazioni delle proprietà fisiche e meccaniche con la percentuale di bitume[6]

Volendo riassumere gli aspetti più peculiari che il metodo Marshall presente, alla luce di tutto quanto esposte in precedenza, è possibile evidenziare le seguenti caratteristiche:

- attenzione alla densità e ai vuoti delle miscele di legante;
- consente di effettuare un'analisi che garantisce appropriate proporzioni volumetriche della miscela in modo da permettere la realizzazione di un HMA durevole;
- economicità dell'attrezzatura richiesta, che risulta essere agevolmente trasportabile;
- semplicità d'uso e sufficiente reperibilità;
- il provino risulta di dimensioni ridotte (101 mm x 63 mm);
- il dominio interessato è quello in cui la curva sforzi deformazioni non è considerabile lineare;

- le distribuzioni tensionali indotte sono estremamente complesse;
- i diagrammi tensionali sono posti nel piano diametrale orizzontale;
- dipendenza dalla pezzatura massima;
- la velocità di deformazione è fissata e costante (50,8 mm/min), adatta alla relativa temperatura di prova (60°C);
- la prova non può essere impiegata per caratterizzare il comportamento termo-meccanico costitutivo delle miscele bituminose attraverso diversi stati tenso-deformativi e relativi andamenti differenziali, così come, invece, richiesto nelle modellazioni strutturali;
- la Stabilità Marshall sembra non costituire una stima appropriata della resistenza al taglio delle miscele;
- l'effetto compattante che si ha con tale metodo non permette di simulare la reale densità della miscela in una pavimentazione (l'asse di compattazione e l'asse di carico sono tendenzialmente ortogonali);
- non sono considerate sollecitazioni multiassiali con carichi dipendenti dal regime deformativi (feed-back);
- infine non consente di calcolare adeguatamente la forza di scorrimento dell'HMA.

Dalla suddetta, molto schematica, elencazione si evince la presenza di tali lacune, che potremmo vedere come i difetti del metodo Marshall e che impediscono un accurato studio degli effetti dell'ormaiamento.

3.4.2 Metodo HVEEM

Un approccio alternativo al precedente appena descritto è fornito dal metodo di Hveem, studiato da Francis Hveem e perfezionato successivamente.

La procedura è normata alle ASTM D 1561 e AASHTO T 246 e non è utilizzata per l'HMA al di là dell'ovest degli Stati Uniti.

Il metodo è caratterizzato alla seguente procedura:

- scelta degli aggregati;
- scelta del bitume (prova Centrifuge Kerosene Equivalent CKE e previsione % di ottimo);
- compattazione con Kneading Compactor (ASTM D 1561);

- determinazione della stabilità Hveem (effettuata con provini cilindrici che vengono sottoposti a prove triassiali per valutare le pressioni verticali sulle facce piane e quelle di confinamento sulle superfici laterali).

Il metodo prevede la valutazione della stabilita, della densità e del rigonfiamento in presenza di acqua e la tecnica di compattazione ha il vantaggio fondamentale di simulare accuratamente ciò che si verifica in sito.

La relativa stabilità Hveem è espressione dell'attrito interno del materiale, componente essenziale della resistenza al taglio.

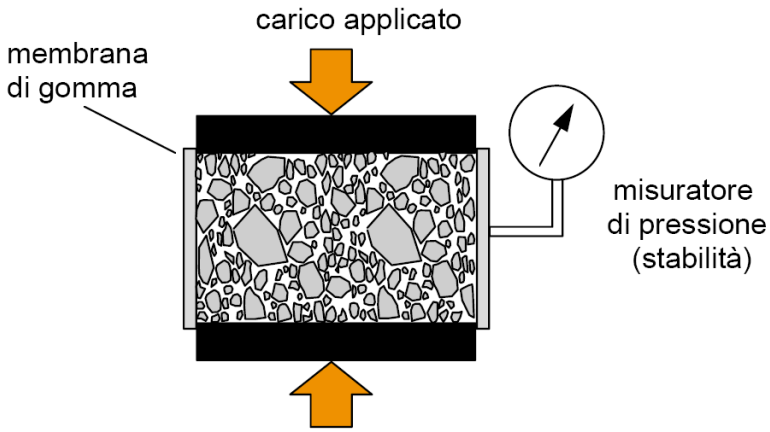


Figura 3-26 - Schema del metodo di Hveem[6]

Il rovescio della medaglia è rappresentato, in primis, dai costi elevati e dalla non facile trasportabilità della strumentazione (a differenza della prova Marshall); in secondo luogo, la procedura potrebbe tradursi in protocolli di progetto definiti approssimativamente, con possibilità di insufficiente longevità della miscela in relazione, per esempio, a ridotti contenuti di bitume. A quanto detto si aggiunga, inoltre, il fatto che il metodo risulta poco sensibile alle caratteristiche del legante e può non condurre ad una corretta ottimizzazione della vita utile all'ormaiamento. Infatti, per quanto attiene le deformazioni permanenti, la prova può condurre a valutazioni comparate inesatte e le dimensioni dei provini risultano essere piuttosto ridotte (63 mm x 101 mm).

3.4.3 Metodo SHRP

Si è già detto, in merito alla procedura di formulazione delle miscele, della prova Marshall; al fine di ottenere lo stesso risultato esiste un'altra procedura, al pari rilevante e di cui occorre tenere conto, si tratta del metodo Superpave dello SHRP (*Strategic Highway Research Program*).

Di tale metodo si è avuto modo di anticipare qualche nozione nei paragrafi precedenti, adesso occorre però soffermarsi in modo più dettagliato.

Secondo la metodologia SHRP Superpave la vita del legante, schematicamente, potrebbe suddividersi nelle seguenti 3 fasi:

1) Bitume intatto: comprende le fasi che precedono la lavorazione, come lo stoccaggio e la movimentazione;

2) Fase di produzione: inizia dal riscaldamento in impianto per concludersi alla fine delle operazioni di posa (rullaggio) della sovrastruttura, includendo quindi le modificazioni subite dal legante durante il processo di produzione del conglomerato;

3) Invecchiamento: variazione delle caratteristiche del legante durante gli anni di esercizio all'interno della sovrastruttura.

Figura 3-27 - Pressure Aging Vassel (PAV) [6]

La seconda fase di vita del legante può essere simulata tramite il metodo RTFOT[1] il quale riproduce, all'interno di un forno, il

[1] Per un maggiore approfondimento si rinvia allo standard AASHTO T 240 and ASTM D 2872. Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)

corrispondente deterioramento del legante detto "invecchiamento di breve periodo"; la terza fase, di "lungo periodo", può essere simulata tramite Pressure Aging Vassel Test (PAV Test)[2].

Questa prova, la cui attrezzatura è visibile in Figura 3-27, consiste nell'accelerare l'invecchiamento del bitume tramite un elevato stress termico e di pressione, in modo tale da simulare in poco tempo quello subito a lungo termine da 5 a 10 anni di esercizio in opera. Il bitume, preventivamente invecchiato col procedimento RTFOT, è disposto al di sopra di piatti piani metallici (Figura 3-28) disposti in un raccoglitore posizionato per 20 ore internamente ad una camera pressurizzata (Figura 3-29) a 2100 ± 100 kPa ed a una temperatura di 90 °C, 100 °C o 110 °C, in funzione della massima sollecitazione di progetto della sovrastruttura.

Figura 3-28 - Contenitore del bitume da inserire all'interno del PAV[6]

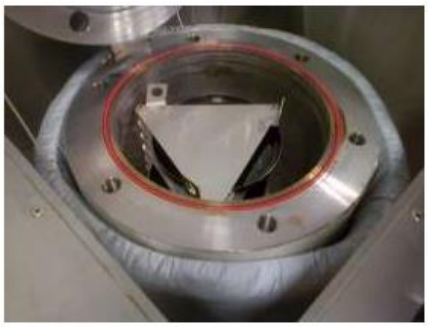


Figura 3-29 - Posizionamento del castello porta contenitori all'interno del PAV[6]

I dettami dello SHRP possono essere utilizzati per il controllo dei tre principali dissesti delle pavimentazioni:

- Fessurazione a fatica;

[2] Per un maggiore approfondimento si rinvia allo standard AASHTO R 28: Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)

- Ormaiamento;
- Fessurazione termica.

L'innovazione nella caratterizzazione dei leganti bituminosi si traduce anche in una nuova classificazione degli stessi, espressa tramite una coppia di valori rappresentativa di una combinazione di temperature, del tipo:

$$PG\ x - y \tag{3-19}$$

Dove:

- PG è l'acronimo di "Performance Graded";
- x è la temperatura massima di progetto, ottenuta come media delle sette temperature giornaliere più calde riscontrate durante l'anno;
- y è la temperatura minima di progetto, coincidente con la temperatura più fredda riscontrata durante l'anno;

Tale classificazione evidenzia una differenza di approccio concettuale nella progettazione del legante per il quale i requisiti richiesti in termini di proprietà fisiche sono sempre gli stessi e il bitume viene contraddistinto in classi solo per la temperatura alla quale detti requisiti sono soddisfatti.

3.5 Decadimento prestazionale del c.b.

La pavimentazione, a causa dei carichi che continuamente la interessano, è soggetta tanto a sforzi di compressione verticale (che incidono all'interno dello strato di legante), quanto a sforzi di trazione orizzontale (che occupano gli strati più profondi del legante). L'HMA deve essere realizzato in modo tale da resistere internamente agli sforzi di compressione e, contestualmente, prevenire le deformazioni permanenti. Contestualmente deve presentare un'adeguata resistenza a trazione al fine di resistere allo sforzo di trazione alla base dello strato di legante, ed essere in grado di resistere anche alla tensione impartita dal rapido decremento delle temperature nelle stagioni invernali.

Il metodo Superpave si occupa di tre principali ammaloramenti cui le pavimentazioni stradali vanno incontro: rottura a fatica, rottura a basse temperature e deformazione permanente.

3.5.1 Il fenomeno della rottura per fatica

La rottura per fatica si sviluppa a seguito di eccessive sollecitazioni subite dalla pavimentazione e dovute all'applicazione di continui carichi che, a lungo andare, creano delle fessure. Le fessure longitudinali che per prime si manifestano, rappresentano il segnale iniziale del fenomeno cui seguirà una progressiva evoluzione in cui queste si congiungeranno tra loro dando origine alla formazione di più fessure.

Lo stato avanzato di rottura prende il nome di fessurazione reticolare a maglie strette ed è caratterizzato da una serie di fessure trasversali che congiungono quelle longitudinali. Solo in casi estremi si realizzerà una buca dove pezzi di pavimentazione vengono dislocati dal traffico.

Figura 3-30 - Rottura a fatica di una pavimentazione

La rottura per fatica può essere causata da molteplici fattori: le pavimentazioni con strati sottostanti sottili e deboli sono, ad esempio, soggetti a deflessioni sotto l'effetto di carichi, ma anche un drenaggio scadente o una pavimentazione sottodimensionata contribuiscono all'evolversi del problema.

Delle volte, poi, la rottura per fatica rappresenta solo un segnale che la pavimentazione ha superato il numero di applicazioni di carichi previsti già in fase progettuale, in questo caso, al fine della risoluzione del problema, sarà sufficiente operare un restauro.

Se, però, la rottura si realizza in tempi profondamente minori rispetto a quelli preventivati in sede di progettazione, ciò vuol dire, probabilmente, che qualche errore è stato fatto già in questa fase, ad

esempio sottovalutando i carichi di traffico cui sarebbe andata incontro la pavimentazione stessa.

Per ovviare a tale eventualità potranno essere adottati i seguenti accorgimenti:

- Valutare adeguatamente il numero di mezzi pesanti durante la fase di progetto;
- Mantenere dei substrati asciutti attraverso l'impiego di qualsiasi tipo di mezzo disponibile;
- Utilizzare pavimentazioni più spesse;
- Utilizzare materiali che non si indeboliscano eccessivamente in presenza di umidità;
- Utilizzare, infine, materiali che siano abbastanza resilienti, cioè capaci di resistere a deflessioni normali.

Sulla scorta delle affermazioni appena dette, l'HMA deve avere assumere un adeguato comportamento elastico che gli consenta di resistere a ripetute applicazioni di carico senza rompersi.

Nel momento in cui ad una pavimentazione è applicato un carico, si manifestano delle tensioni orizzontali negli strati inferiori del legante. È proprio in queste zone che il materiale deve mostrare particolari requisiti di resistenza, assumendo il comportamento di un soffice materiale elastico che eviti l'insorgere di deformazioni che portano alla rottura, infatti, poiché i leganti soffici hanno delle proprietà a fatica superiori rispetto a quelli duri, vengono indicati dei limiti superiori di rigidezza oltre i quali un legante non deve andare.

Le tipologie di rottura in una pavimentazione sono le seguenti:

Rottura per fatica di tipo bottom-up

Questa tipologia di frattura, quale conseguenza della ripetuta sollecitazione di flessione nelle pavimentazioni stradali originata dal traffico stradale, inizia dalla superficie inferiore degli strati bituminosi per poi propagarsi successivamente verso l'alto. In una fase iniziale, infatti, appare una piccola frattura longitudinale lungo la traiettoria dello pneumatico, che poi si sviluppa rapidamente su una superficie più ampia formando una rete a maglie strette, dalla quale deriva il nome di ammaloramento a "pelle di coccodrillo" (Alligator Cracking).

Il meccanismo appena descritto è illustrato in Figura 3-31 ed in Figura 3-32, dove vengono rappresentati gli strati più superficiali di

una pavimentazione flessibile costituita da uno strato sottile di conglomerato, steso su uno strato di base. Già dalla lettura delle immagini, si evince chiaramente come l'origine delle fratture sia localizzata nell'interfaccia tra lo strato di base non legato e lo strato bituminoso.

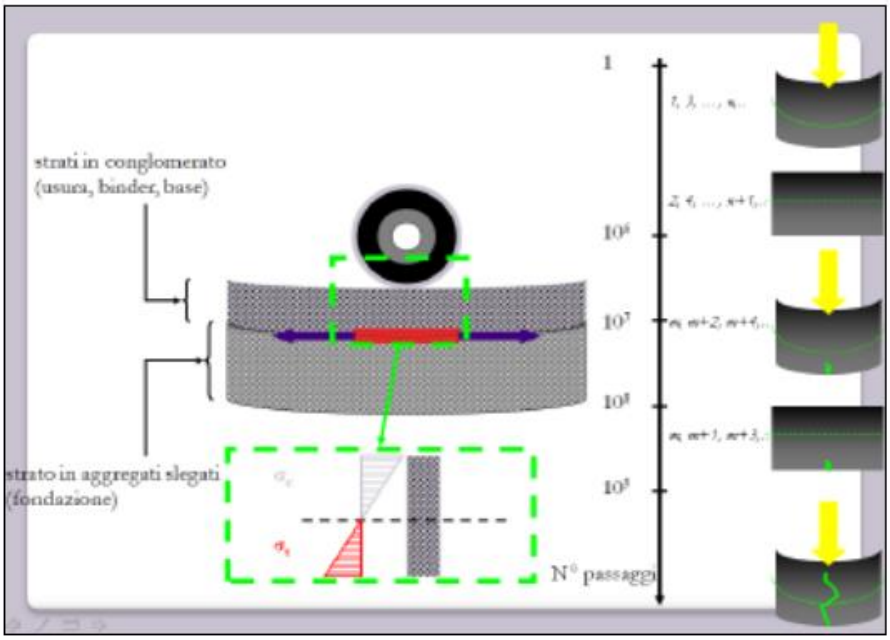


Figura 3-31 - Rottura a fatica di tipo bottom-up[10]

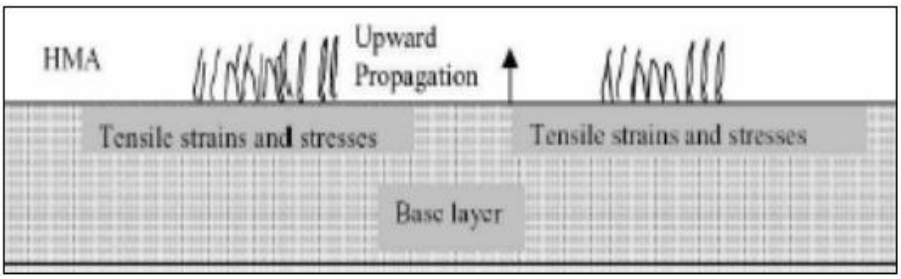


Figura 3-32 - Meccanismo di rottura per fatica di tipo bottom-up[10]

Le elevate deformazioni o tensioni di trazione al di sotto dello strato legato che generano questo tipo di fessurazione non sono legate ad un'unica causa eziologica, potendo originare da molteplici fattori: dagli spessori troppo sottili all'impiego di conglomerati inidonei ai carichi in esercizio; per l'intensità e la ripetizione del carico indotto dal traffico stradale più alti e maggiore pressione dei pneumatici; strati di fondazione non compattati adeguatamente ed uniformemente oppure

presenza di aree più deformabili legate a sottoservizi o variazioni localizzate dell'umidità o del livello della falda.

Rottura per fatica di tipo top-down (o fessurazione longitudinale)

Seppure la maggior parte delle fratture originano al di sotto degli strati bituminosi, le fessure indotte dal carico, a contrario, possano anche avere inizio in superficie e propagarsi verso il basso. Le opinioni tendenti a giustificare i meccanismi che causano questo tipo di rottura sono diverse, tuttavia, non esistendo dati inconfutabili o particolarmente attendibili in tal senso, non è possibile propendere verso una, piuttosto che verso un'altra tesi. Tali argomentazioni possono sicuramente sintetizzarsi nei seguenti termini: secondo una prima scuola di pensiero, la causa dell'innesco e propagazione della fessurazione sarebbe la presenza del carico indotto dal costante passaggio dei veicoli che provoca lo sviluppo di elevate tensioni e deformazioni in superficie; altre teorie, per converso, imputano l'innesco della fessurazione sullo strato superficiale agli sforzi di taglio indotti dallo pneumatico in prossimità del bordo dello stesso. In ogni caso, l'invecchiamento del conglomerato bituminoso causato anche dai raggi UV e dagli elevati sbalzi termici accelera entrambi i processi., Secondo una terza tesi, infine, la causa della fessurazione sarebbe dovuta all'aumento di rigidezza dello strato superficiale indotta dall'invecchiamento avanzato del conglomerato bituminoso, in concomitanza con le elevate pressioni di contatto. Tale meccanismo di propagazione della frattura è illustrato in Figura 3-33 ed in Figura 3-34.

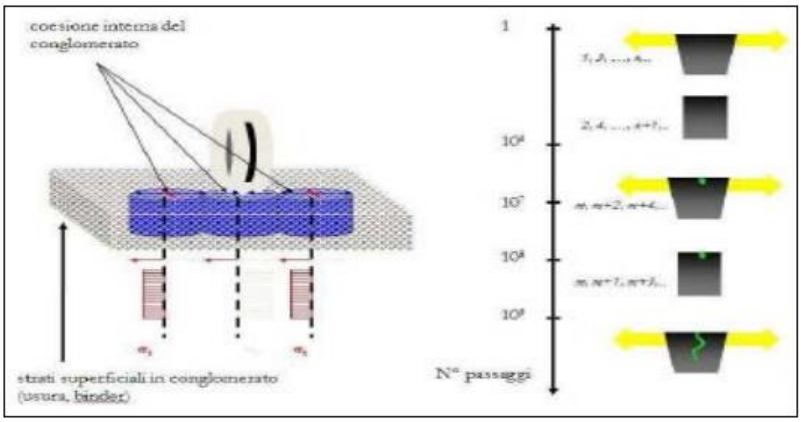


Figura 3-33 - Rottura per fatica di tipo top-down[10]

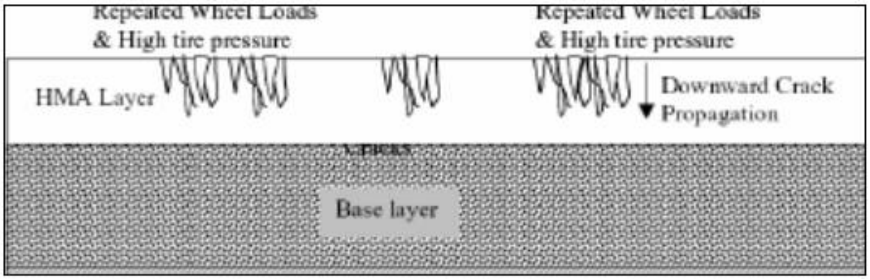


Figura 3-34 - Meccanismo di rottura per fatica di tipo top-down[10]

Fessurazioni di natura termica

La fessurazione delle pavimentazioni flessibili causata dalla temperatura si riferisce o alla presenza di temperature particolarmente basse ovvero da oscillazioni termiche elevate. Tale rottura appare tipicamente come una fessurazione trasversale in superficie, infatti le fessure risultano pressoché perpendicolari all'asse stradale. Le rotture causate dagli abbassamenti di temperatura, che si verificano soprattutto in regioni con un clima estremamente freddo, sono dette anche "Low Temperature Cracking", mentre le rotture causate da cambiamenti termici ciclici sono conosciute anche come "Thermal Fatigue Cracking" e si verificano in regioni caratterizzate da un clima con forti escursioni termiche giornaliere e stagionali. È possibile distinguere due tipologie di fratture: quelle trasversali si manifestano in una prima fase e sono seguite, in una fase successiva, quelle in blocco a causa dell'invecchiamento del conglomerato che diventa progressivamente più fragile.

3.5.2 Il fenomeno di accumulo di deformazioni permanenti

Le deformazioni permanenti rappresentano una tipologia di ammaloramento caratterizzato dall'accumulo nel tempo di piccole quantità di deformazioni che si realizzano a seguito di applicazioni di carichi, a ciascuno dei quali corrisponde una deformazione costituita da due aliquote: una elastica ed una plastica. L'aliquota elastica tende a scomparire nel momento in cui il carico smette di agire, quella plastica, invece, rimane anche dopo l'applicazione del carico.

Le aliquote cd. irreversibili si sommano all'aumentare delle applicazioni dei carichi diventando sempre più evidenti fino a formare un'ormaia, causando una deformazione che aumenterà all'aumentare

delle applicazioni dei carichi come si evince dal seguente diagramma deformazioni-applicazioni dei carichi.

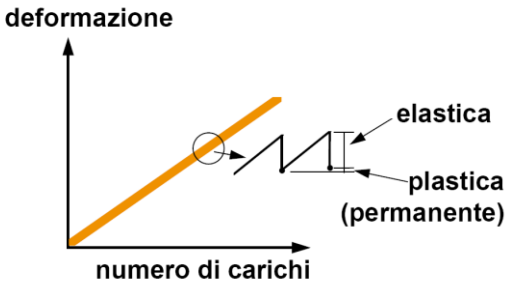


Figura 3-35 - Legame deformazioni-numero di applicazione dei carichi[6]

Le tipologie di accumulo di deformazioni permanenti sono le seguenti:

- Addensamento;
- Deformazione tangenziale e scorrimento laterale;
- Rifluimento.

Sono due le cause fondamentali che possono dare vita a questo tipo di deformazione: tensioni ripetute applicate alla sottobase ovvero un'insufficiente resistenza al taglio della miscela di legante.

Limitatamente alla prima, sebbene l'utilizzo di materiali rigidi abbaino ridotto questa tipologia di deformazione, essa rappresenta, ancora oggi, un problema più di ordine strutturale che non dei materiali. Non è, infatti, possibile costruire una pavimentazione che sia abbastanza resistente o spessa e capace di ridurre le tensioni applicate ad un livello tollerabile.

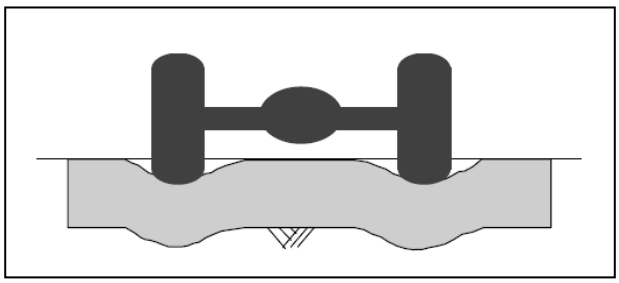


Figura 3-36 - Ormaiamento su base o sottofondo debole

La seconda delle citate cause prende in considerazione una tipo di ormaia più preoccupante della prima poiché interessa gli strati superficiali della pavimentazione ed è dovuta ad un'insufficiente

resistenza al taglio della miscela di legante, che accumula piccole, ma permanenti, deformazioni a ciascun passaggio dei mezzi pesanti formando un solco nella pavimentazione.

Generalmente le ormaie si presentano nelle zone della pavimentazione più indebolite e soggette ad elevate temperature.

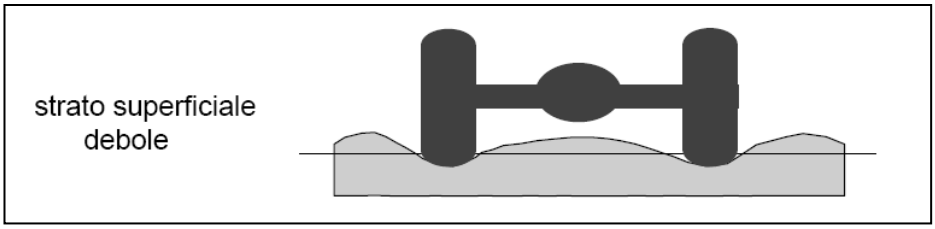


Figura 3-37 - Ormaiamento su strato superficiale debole

Lo studio delle ormaie considera complessivamente la miscela di aggregati e di bitume ed è, pertanto, applicare l'equazione di Mohr-Coulomb al conglomerato bituminoso.

$$\tau = c + \sigma(\tan \phi)$$

resistenza di taglio
contributo del legante
tensione normale
contributo dell'aggregato

In questo caso, τ indica la resistenza al taglio del conglomerato bituminoso, la coesione c è il contributo di resistenza al taglio del legante, mentre il contributo dell'aggregato è rappresentato dall'angolo di attrito ϕ e dipende dalla tensione normale σ.

L'ormaia rappresenta l'accumulo di piccolissime deformazioni permanenti, pertanto, un buon metodo per assicurare lo sviluppo di una buona resistenza al taglio è quello di utilizzare un legante che non sia solo rigido ma, di più, che si comporti come se fosse un solido elastico ad alte temperature.

Volendo utilizzare un legante con elevate caratteristiche di resistenza, il contributo del coefficiente c nell'equazione già citata risulterebbe più elevato rispetto a quello che si avrebbe utilizzando un legante di scarsa resistenza.

Da un punto di vista matematico, poi, la retta di inviluppo a rottura rimarrebbe a pendenza costante ma salirebbe verso l'alto, per cui a

parità di tensione normale si otterrebbe una resistenza al taglio più elevata.

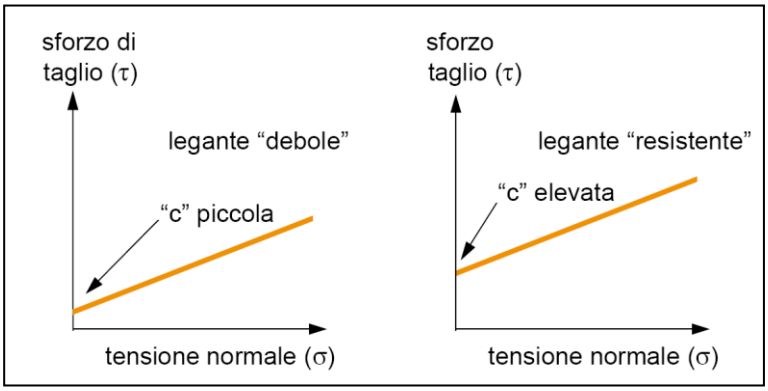


Figura 3-38 - Confronto tra tipologie di leganti sul piano di Morh-Coulomb

Infine, un ulteriore modo per aumentare la resistenza al taglio del c.b. è selezionare un aggregato con elevato attrito interno.

Elevati angoli di resistenza al taglio sono caratteristici di aggregati cubici con una struttura superficiale ruvida che mostrano una elevata azione di contatto tra le particelle. All'applicazione dei carichi, le particelle di aggregato si stringono insieme comportandosi come se fossero una larga pietra singola ed elastica. In tal modo l'aggregato agirà, insieme al legante, come un elastico, tornando alla posizione originaria senza accumulo di deformazioni permanenti.

Un aggregato con un elevato angolo di resistenza al taglio mostra una pendenza della retta di inviluppo più elevata rispetto a quella ad un aggregato con un angolo più piccolo. Per cui, a parità di tensione normale, si ha una resistenza al taglio più elevata.

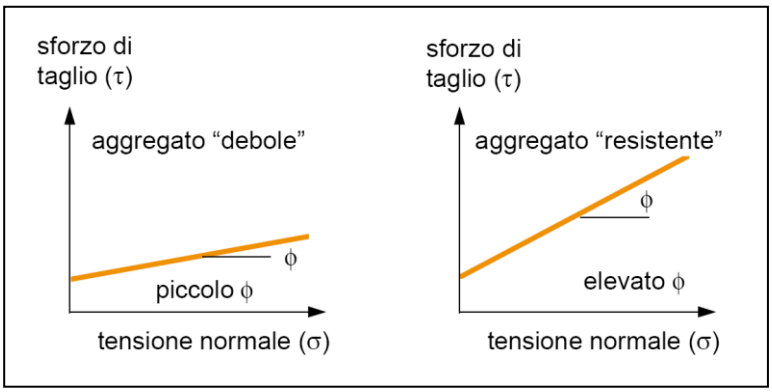


Figura 3-39 - Confronto tra tipologie di aggregati sul piano di Morh-Coulomb

4 Lo studio a mesoscala del conglomerato bituminoso

Osservato a grandi linee e nel suo complesso, il c.b. potrebbe essere considerato un materiale omogeneo, tuttavia, se analizzato dettagliatamente e, soprattutto, da un punto di vista prettamente meccanico, è, per converso, facile notare come il suo comportamento sia, in realtà, di complessa definizione.

Per comprendere appieno la reologia di questo materiale è necessario, pertanto, condurre un'indagine più da vicino, esaminando quali possano essere le mutue interazioni tra le diverse fasi che compongono il sistema anche in situazioni limite, come accade ad esempio durante la fase di propagazione della frattura.

Innanzitutto, come si è già avuto modo di anticipare a conclusione del precedente capitolo, ad una già rapida analisi della letteratura, è abbastanza palese come non esista un univoco orientamento nella materia di cui oggi si discute. Gli autori che, nei loro studi, si sono occupati della questione, infatti, non propendono verso un indirizzo comune ma, per converso, danno luogo principalmente alle seguenti scuole di pensiero:

- la prima predilige una visione prettamente teorica. Secondo tale orientamento, l'obiettivo principale sarebbe quello di interpretare il comportamento del materiale mediante micro-simulazioni numeriche ad elementi finiti e modellazione dei legami costitutivi;
- la seconda si orienta verso uno studio di natura sperimentale. Attraverso la sperimentazione e, specificamente, tramite test di laboratorio opportunamente monitorati, viene valutato il rapporto tra le diverse fasi della miscela.

Il primo approccio concentra lo studio sulla definizione di algoritmi per modellare il sistema di fasi aggregati-bitume, al fine di ottenere una rappresentazione del materiale più realistica possibile.

Il modello del materiale viene così sottoposto a prova mediante simulazioni numeriche volte ad analizzare le caratteristiche della miscela ed i relativi effetti globali che poi, solo in una fase successiva, sono confrontati e validati con un'analisi sperimentale.

Il principale vantaggio di questo metodo, infatti, risiede nell'utilizzo di procedure numeriche che consentono di superare agevolmente alcune difficoltà delle prove sperimentali spesso non trascurabili.

Le problematiche che molto spesso riguardano tali prove sono generalmente di carattere tecnico ed economico: dal punto di vista tecnico le prove sperimentali sono difficilmente ripetibili e sono particolarmente sensibili alla struttura e conformazione del campione; dal punto di vista economico, le articolate procedure di confezionamento e di prova dei campioni e la necessità di avere un numero di prove statisticamente significativo (oltre al costo necessario per acquisire il materiale, la strumentazione e per pagare il personale), rende questi test eccessivamente onerosi tanto in termini economici quanto di tempo.

I modelli numerici permettono, per converso, di conoscere con un buon grado di esattezza le caratteristiche geometriche e fisiche delle diverse fasi, un aspetto di non poco conto nell'analisi a mesoscala del materiale, risultando pertanto perfettamente misurabili.

Sebbene le tecniche numeriche possiedano vantaggi potenziali ed estremamente interessanti, esiste anche un rovescio della medaglia, rappresentato dalla circostanza per cui questi strumenti sono difficili da controllare e possono, sovente, condurre a risultati errati e fuorvianti.

L'ottimo, pertanto, è raggiungibile solo con un corretto bilanciamento tra simulazione e validazione sperimentale.

Nel secondo approccio si eseguono direttamente delle prove sperimentali controllando, per quanto possibile, un insieme di parametri riguardanti sia il campione da esaminare che la prova stessa.

Data la particolare sensibilità del bitume alle variazioni di temperatura, le prove vengono eseguite sempre in un ambiente termicamente controllato, ripetendole anche a diverse temperature.

I test vengono monitorati durante tutta la loro esecuzione mediante una moltitudine di tecniche al fine di reperire quante più informazioni utili all'indagine. A tal proposito sono frequentemente utilizzate delle telecamere ad alta risoluzione che inquadrano il

provino durante l'evoluzione del test e registrano immagini che vengono successivamente elaborate per ricostruire e stimare gli stati deformativi del provino stesso.

Per quanto riguarda i campioni, il confezionamento viene eseguito cercando di ottenere miscele omogenee e scegliendo dimensioni del provino sufficientemente rappresentative del materiale.

Per lo studio a posteriori dell'assortimento granulometrico e la dislocazione degli aggregati si possono adoperare tecniche di ricostruzione tridimensionale del provino che necessitano di informazioni di base ricavabili tramite una serie di immagini 2D parallele [11] oppure mediante tomografia computerizzata. Successivamente, mediante tecniche di *image processing*, si riescono a determinare i parametri del modello e interpretare la geometria e la distribuzione degli aggregati.

Si comprende bene che, sebbene l'analisi sperimentale sia fondamentale e rispondente al vero, esistono delle difficoltà oggettive che ne limitano l'utilizzo poiché la ricostruzione del provino è una procedura dispendiosa e che richiede molto tempo.

In questo capitolo sarà presentata la tematica dello studio a mesoscala del conglomerato bituminoso facendo dapprima un riferimento ai concetti base posti a fondamento dello studio e, successivamente, sarà rappresentato lo scenario attualizzato e generale degli approcci già in uso ed in fase di validazione in campo internazionale.

Infine, saranno descritti i principali modelli adoperati per riprodurre i materiali multifase e per simulare il complesso meccanismo di rottura degli stessi.

4.1 Il concetto di mesoscala e mesostruttura

La miscela costituente il c.b. è composta essenzialmente da tre fasi: la prima, costituita dagli *aggregati* che, come già precedentemente esposto, hanno un comportamento rigido–fragile e possono assumere diverse forme e dimensioni; la seconda, rappresentata dal *bitume* che ha un comportamento elastoplastoviscoso e riempie (ma non del

tutto) gli spazi intergranulari; la terza, infine, rappresentata proprio dai *vuoti* rimanenti.

Da un punto di vista analitico, quindi, il c.b. è un materiale composito particellare piuttosto complesso per il quale non si può negare che le caratteristiche fisiche e meccaniche rappresentanti la *performance globale* del materiale siano indissolubilmente legate ad altre caratteristiche locali che ne influenzano il comportamento e che generalmente vengono definite "mesostrutturali".

Col termine mesostruttura si intende, in particolare, la struttura interna di un materiale ad un livello intermedio, ovvero osservata da una scala di visualizzazione, definita "mesoscala", nella quale può essere messa a fuoco l'interazione in essere tra le diverse fasi del materiale. I fattori mesostrutturali possono essere definiti come dei parametri che, esulando dalle interazioni fisiche a livello molecolare tra le fasi, di norma regolano il rapporto tra le diverse fasi del sistema modificando sensibilmente il comportamento macroscopico del materiale composito.

Tra i fattori più classici degli studi condotti negli ultimi decenni, si annoverano: il contenuto di bitume, la percentuale dei vuoti, la distribuzione granulometrica degli aggregati, la forma degli stessi ed il loro orientamento.

Lo studio del comportamento del materiale a livello di mesoscala potrebbe rilevarsi, pertanto, un proficuo strumento per conoscere e predire il comportamento macroscopico di un c.b. a partire dalle caratteristiche dei suoi singoli componenti. Inoltre, la possibilità di comprendere appieno i meccanismi fondamentali che ruotano attorno alla formazione e alla propagazione di una frattura è una sfida importante per chi si proponga come obiettivo un'accurata progettazione, produzione e manutenzione delle pavimentazioni.

Essendo il c.b. un prodotto caratterizzato da una particolare eterogeneità, l'utilizzo di un modello omogeneo per la simulazione di una frattura non può portare ovviamente a risultati attendibili e, pertanto, la semplice rappresentazione al continuo sarebbe poco realistica, oltre ad avere parametri difficilmente caratterizzabili e percorsi delle fratture assai diversi da quelli reali. D'altro canto, le fratture che si possono osservare nel c.b. assumono dei percorsi

estremamente frastagliati, presentando cavità e protuberanze che, per essere riprodotte e studiate, necessitano un'accurata modellazione numerica del sistema proprio attraverso la sua mesostruttura.

4.2 Modelli reologici al continuo

Nel presente paragrafo sono discusse le leggi costitutive più diffuse in letteratura atte a rappresentare il comportamento a macro-scala del conglomerato bituminoso, ovvero prescindendo dalla reale interazione tra le diverse fasi della miscela ed esaminando unicamente la risposta strutturale nel suo complesso. I modelli reologici al continuo trovano applicazione nelle simulazioni con codici di calcolo ad elementi finiti al fine di stimare lo stato tenso-deformativo dei provini sottoposti a test statici o dinamici.

La principale sfida dei ricercatori in quest'ambito consiste proprio nel rappresentare nel modo più attendibile possibile la complessità della miscela con delle leggi relativamente semplici da applicare ad un mezzo continuo. È bene ribadire come la miscela presenti, infatti, una risposta elastica, viscoelastica lineare, viscoelastica non lineare o visco-elasto-plastica, che muta a seconda dalla temperatura, dell'intensità e della frequenza della forza, in particolare: per piccole deformazioni il materiale sviluppa un comportamento lineare, mentre nel caso più generale la miscela manifesta un comportamento visco-elasto-plastico in campo non lineare.

Le leggi costitutive per la rappresentazione analitica di tipo fenomenologico della risposta meccanica del c.b. possono essere modellizzate in base a schemi meccanici di più molle e smorzatori con comportamento macroscopico analogo a quello del provino. Questi elementi vengono combinati in serie e/o in parallelo e i loro parametri sono opportunamente calibrati per riprodurre le stesse deformazioni che il materiale esibisce in laboratorio nelle medesime condizioni di carico.

Nel presente capitolo saranno trattati i principali modelli costitutivi del conglomerato bituminoso utilizzati dai ricercatori nelle simulazioni con codici di calcolo FEM o DEM [12], al fine di riprodurre

correttamente lo stato tenso-deformativo dei provini sottoposti a test statici o dinamici.

4.2.1 Modello elastico lineare

Il modello costitutivo elastico lineare è il più semplice da adottare per un conglomerato bituminoso. Un materiale può essere definito a comportamento elastico quando la curva di scarico sia identica a quella di carico e la deformazione sia completamente reversibile.

In accordo con la legge di Hooke, i tensori delle tensioni $\{\sigma\}$ e delle deformazioni $\{\varepsilon\}$ sono correlati mediante la matrice di rigidezza [D].

$$\{\sigma\} = [D] \text{ x } \{\varepsilon\} \tag{4-1}$$

$$|D| - \frac{E}{(1+v)\cdot(1-2v)} \begin{bmatrix} 1-v & v & v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-v & v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v & 1-v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v & v & 0.5-v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-v \end{bmatrix} \tag{4-2}$$

L'elasticità del materiale viene quindi definita dalla coppia di parametri E e v, rispettivamente il modulo di Young ed il coefficiente di Poisson; se si vuole considerare una rigidezza variabile in funzione della temperatura e del tempo di carico in una miscela con, può essere sostituito ad E il modulo di rigidezza S_{mix} della miscela da Van der Poel[13].

4.2.2 Modelli viscoelastici

I materiali viscoelastici presentano uno stato tenso-deformativo che dipende dal tempo. I c.b. possono essere studiati con modelli viscoelastici lineari per bassi livelli di tensione e deformazione [14].

Questi modelli sono stati affinati negli anni per interpretare il comportamento del c.b. nella sua interezza con l'aggiunta di componenti elastiche, plastiche, viscoelastiche e viscoplastiche[15]–[18]. Le deformazioni e le tensioni del materiale viscoelastico incomprimibile sono state ricavate da Johnson tramite le equazioni (4-3) e (4-4)[19].

$$\sigma = \int_0^1 Y(t-t')\frac{\partial\varepsilon(t')}{\partial t'}dt' \tag{4-3}$$

$$\varepsilon = \int_0^t J(t-t')\frac{\partial\sigma(t')}{\partial t'}dt' \qquad (4\text{-}4)$$

Dove la tensione deviatorica σ e la deformazione deviatorica ε sono espresse rispettivamente in funzione del modulo di rilassamento *Y(t)*, indicativo della variazione dello stato tensionale per incremento infinitesimo di deformazione, e della cedevolezza da deformazione viscosa (*creep compliance*) *J(t),* indicativa della variazione di deformazione per incremento infinitesimo di tensione.

In particolare, Johnson si soffermò sullo studio della deformazione di un materiale viscoelastico ideale rappresentato mediante due modelli meccanici, che sviluppano separatamente deformazioni elastiche ritardate e deformazioni viscose, cui è applicata una tensione costante:

- il modello di Zener, in Figura 4-1a, simula gli effetti dell'elasticità ritardata mediante la connessione di molle con costanti elastiche K_1 e K_2 e di un dissipatore con coefficiente di smorzamento viscoso C;
- il modello di Maxwell, in Figura 4-1b, simula invece gli effetti della deformazione viscosa con una molla di costante *K* ed uno smorzatore di costante *C* disposti in serie., al fine di sviluppare nel tempo una deformazione ε secondo la seguente equazione

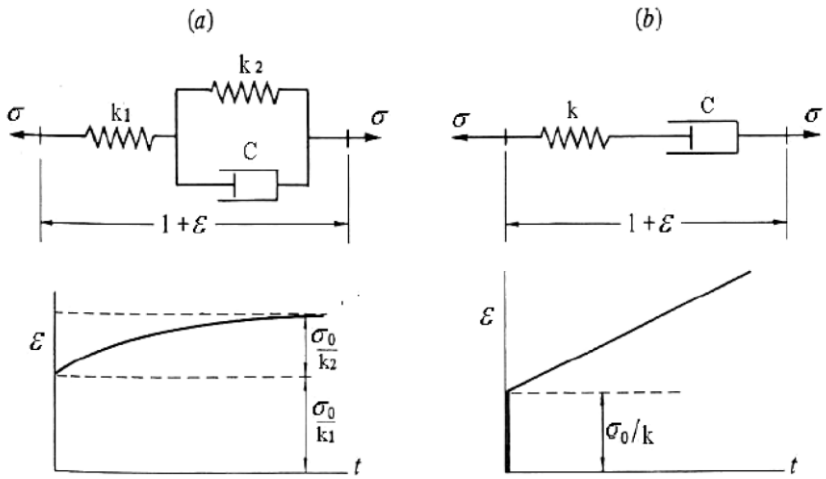


Figura 4-1 - Modelli viscoelastici di Johnson per lo studio dell'elasticità ritardata (a) e della deformazione viscosa (b) sotto carico costante [12]

La deformazione ε per il modello di Zener soggetto alla tensione costante σ_0, è espressa in base al tempo *t* mediante l'equazione (4-6).

$$\varepsilon(t) = J(t) \cdot \sigma_0 = \left\{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}\left[1 - e^{\left(-\frac{t}{\tau_j}\right)}\right]\right\} \cdot \sigma_0 \tag{4-5}$$

$$\tau_1 = \frac{C}{K_2} \tag{4-6}$$

La deformazione ε per il modello di Maxwell soggetto alla tensione costante σ0, è espressa in base al tempo t mediante l'equazione(4-7):

$$\varepsilon(t) = J(t) \cdot \sigma_0 = \left\{\frac{1}{K} + \frac{1}{C} \cdot t\right\} \cdot \sigma_0 \tag{4-7}$$

Il modello di Burger, rappresentato in Figura 4-2a, è stato invece ideato tramite la combinazione del modello di Kelvin-Voigt e del modello di Maxwell costituita da una coppia molla-smorzatore in parallelo con una coppia molla-ammortizzatore in serie. Tale sistema consente di modellare sia la deformazione elastica ritardata sia quella viscosa indotte nel sistema da una tensione costante σ_0, Figura 4-2b.

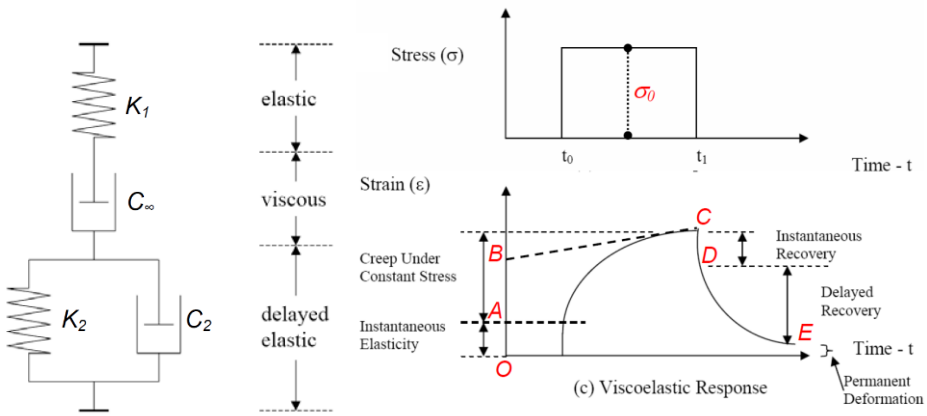


Figura 4-2 - Modello di Burger: a) schema; b) applicazione della tensione e corrispondente risposta deformativa [12]

Nella fase di applicazione del carico, la risposta deformativa presenta un primo tratto *OA* elastico istantaneo, seguito da una curva *AC* di combinazione della risposta elastica ritardata *AB* con quella viscosa *BC*. Terminata l'applicazione della tensione costante σ_0, sia la deformazione elastica istantanea *CD* che buona parte di quella elastica ritardata *DE* viene restituita, evidenziando infine una componente irreversibile *OE*.

L'equazione che esprime la risposta deformativa del modello è la seguente:

$$\varepsilon(t) = J(t).\sigma_0 = \left\{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{C_\infty} + \frac{1}{K_2}\left[1 - e^{\left(-\frac{t}{\tau_j}\right)}\right]\right\}.\sigma_0 \tag{4-8}$$

$$\tau_1 = \frac{C_2}{K_2} \tag{4-9}$$

Nei casi in cui il c.b. sia soggetto ad elevati livelli tensionali e deformativi oppure sia sottoposto a carichi ciclici, i modelli viscoelastici lineare perdono la loro efficacia e sono sostituiti da quelli di tipo non lineare, che consentono di interpretare meglio la risposta del materiale. Anche questi modelli sono stati oggetto di studio da parte degli studiosi: Fitzgerald e Vakili, attraverso indagini teoriche e sperimentali, hanno verificato l'adattabilità dei modelli non lineari per la stima dello stato tenso-deformativo di miscele sabbia-bitume[20], mentre Lai e Anderson hanno proposto un modello generalizzato di Kelvin-Voigt non lineare per lo studio del comportamento viscoelastico della miscela[21]. Quest'ultimo modello è costituito da uno smorzatore non lineare in serie ad una catena non lineare di Kelvin per rappresentare la deformazione irreversibile con il primo elemento e quella reversibile con il secondo.

4.2.3 Modelli elastoplastici

Per rappresentare la deformazione plastica del c.b. in funzione della velocità di applicazione del carico, sono stati studiati alcuni modelli costitutivi in base a fattori fondamentali della teoria classica della plasticità dinamica come lo scorrimento superficiale e le risposte deformative di tipo hardening e softening.

Al fine di simulare il danno nelle pavimentazioni flessibili, Collop, Airey, Dunhill e Scarpas hanno proposto un modello elastoplastico ipotizzando che la velocità di applicazione del carico $\dot{\varepsilon}$ sia costituita da due distinte aliquote, una elastica $\dot{\varepsilon}_e$ e l'altra plastica $\dot{\varepsilon}_p$[22]:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_p \tag{4-10}$$

Le suddette aliquote, elastica e plastica, sono rispettivamente espresse mediante le (4-11) e (4-12) come segue:

$$\dot{\varepsilon}_e = D^{e-1}\dot{\sigma} \tag{4-11}$$

$$\dot{\varepsilon}_p = \dot{\lambda}\frac{\partial f}{\partial \sigma} \tag{4-12}$$

con il mantenimento delle condizioni standard di Kuhn-Tucker:

$$\dot{\lambda} \geq 0,\ f \leq 0,\ \dot{\lambda} f = 0 \tag{4-13}$$

La prima dipende da D^e, matrice di elasticità che compare in forma inversa, e dal tensore degli sforzi $\dot{\sigma}$, mentre la seconda da una costante di proporzionalità scalare $\dot{\lambda}$, da una funzione di risposta superficiale f associata allo stato tensionale σ.

L'evoluzione del rifluimento plastico è determinata dalla seguente condizione di consistenza dove con T si indica la temperatura e con κ una misura della risposta deformativa di tipo hardening o softening.

$$\dot{f}(\sigma, \dot{\varepsilon}, T, k) = 0 \tag{4-14}$$

Si distinguono due fasi della deformazione anelastica del materiale: da zero al picco di tensione, la risposta è governata dalla legge di tipo hardening mentre, per tutta la fase di scarico fino all'annullamento della tensione, da quella di tipo softening.

La fase anelastica di tipo hardening è espressa mediante la funzione di scorrimento superficiale f_D secondo le seguenti equazioni:

$$f_D \equiv \frac{J_2}{p_a^2} - F_b\, F_s = 0 \tag{4-15}$$

$$F_b = \left[-\alpha\left(\frac{I_1 - R}{p_a}\right)^n + \gamma\left(\frac{I_1 - R}{p_a}\right)^2\right] \tag{4-16}$$

$$F_s = [1 - \beta\cos 3\theta]^{-0,5} \tag{4-17}$$

$$\cos 3\theta = \frac{\sqrt{27}}{2}\frac{J_3}{J_2^{3/2}} \tag{4-18}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_1(\xi_{p\,\lim} - \xi_p)}{1 + c\,\xi_p} \tag{4-19}$$

Dove F_b è la funzione fondamentale che descrive la forma nello spazio degli invarianti di tensione ed F_s è la funzione di forma che descrive la forma sul piano deviatorico, I_1 , J_2 e J_3 sono i tre invarianti di tensione, p_a è la pressione atmosferica, R è un parametro che definisce la resistenza a trazione triassiale del materiale, α può essere definita come una funzione decrescente all'aumentare di grandezze fisiche come la deformazione o il lavoro plastico. Il valore di α è stimato in funzione delle deformazioni plastiche corrente ξ_p ed a quella $\xi_{p\,\mathrm{lim}}$ determinata sperimentalmente e corrispondente al picco di risposta. Il coefficiente α_1 definisce l'inizio della risposta anelastica e il parametro c è determinato sperimentalmente.

Il coefficiente γ definisce la pendenza del picco di risposta superficiale o della tensione di rottura del materiale, mentre β controlla la forma della superficie di scorrimento nel piano deviatorico.

Il comportamento hardening è controllato tramite il parametro α: quando tale parametro decresce, lo scorrimento superficiale aumenta fino a raggiungere il valore di picco per α uguale a zero, trasformandosi così, nel piano I_1 - $\sqrt{J_2}$, da curva in retta (Figura 4-3).

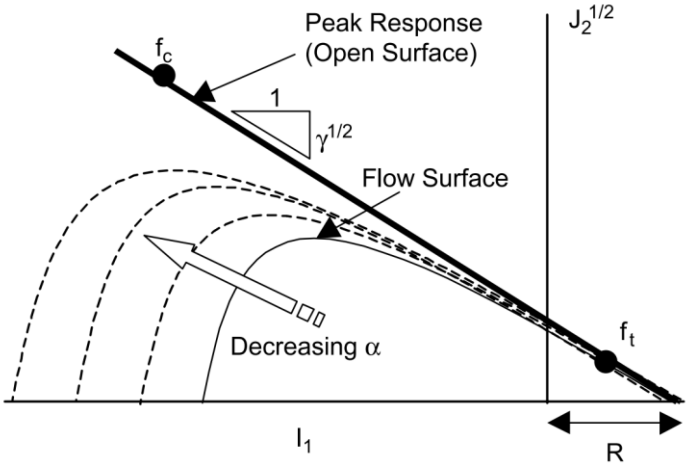


Figura 4-3 - Schema dello scorrimento superficiale nel piano I_1 - $\sqrt{J_2}$ [22]

La risposta del materiale per deformazioni oltre il corrispondente picco di tensione presenta una rigidezza decrescente in base al tempo, simulata con un criterio softening isotropo. Tale criterio è implementato definendo il parametro γ mediante un'equazione

esponenziale decrescente come funzione di decadimento per deformazione plastica successivamente alla rottura ξ_{pf}.

4.2.4 Modelli viscoplastici

Tramite il modello viscoplastico di Tashman è possibile analizzare la deformazione del conglomerato bituminoso sollecitato con forze statiche o dinamiche, conoscendo i parametri rappresentativi della struttura microscopica del materiale [23]. Tale studio è volto alla riproduzione dello stato deformativo di provini cilindrici compattati mediante pressa giratoria ad alte temperature e sottoposti alla prova triassiale di compressione.

Il modello costitutivo relaziona la risposta macroscopica di un materiale come fosse un mezzo continuo alle grandezze microscopiche riportate in Figura 4-4. La struttura granulare del materiale viene quindi rappresentata con grandezze microscopiche di distribuzione media anisotropa per un dato volume di riferimento.

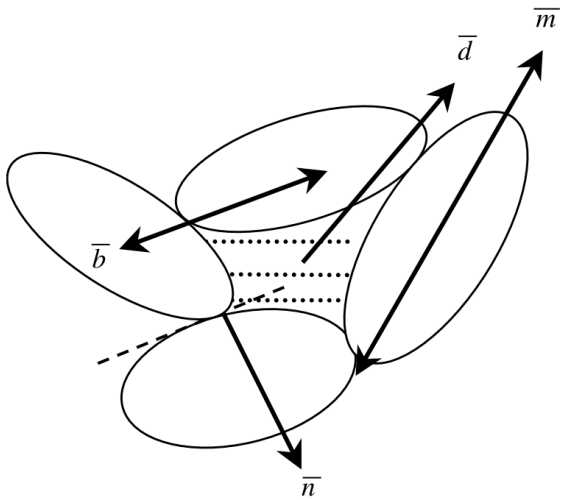


Figura 4-4 - Grandezze microscopiche in un materiale granulare[23]

Si definiscono quindi le seguenti grandezze microscopiche: il versore normale al punto di contatto $\overline{n}$ è il versore ortogonale per il piano tangente alla coppia di particelle nel punto di intersezione; il branch vector $\overline{b}$ è il vettore che congiunge i centri di massa della coppia di particelle; il versore di orientamento della particella $\overline{m}$ è il vettore disposto lungo l'asse di lunghezza maggiore della particella; infine, il

versore di orientamento dei vuoti interparticellari $\bar{d}$ è rappresentativo dell'orientamento di un'area vuota racchiusa con una serie di particelle, espressa in unità dei vuoti.

In un volume elementare di riferimento, delimitato dalla superficie sferica Ω, il tensore della microstruttura F_{ij} viene correlato alla corrispondente funzione densità di probabilità $E(m)$ come segue:

$$F_{ij} = \int_{\Omega} E(m) m_i m_j d\Omega \tag{4-20}$$

Tale funzione è utilizzabile per ognuna delle grandezze microstrutturali, dove m_i è il versore normale dell'angolo solido infinitesimo $d\Omega$ calcolato come $d\Omega = sen\theta \, d\theta \, d\varphi$ nel caso 3D e come $d\Omega =$ dθ in quello 2D.

Il modello costitutivo basato su parametri microscopici dovrà includere il tensore di orientamento delle particelle. Oda e Nakayama hanno sviluppato un tensore microstrutturale di un materiale granulare basato sullo studio della distribuzione del versore di orientamento degli aggregati tramite l'analisi della tomografia di numerosi provini (e.g. Figura 4-5)[23].

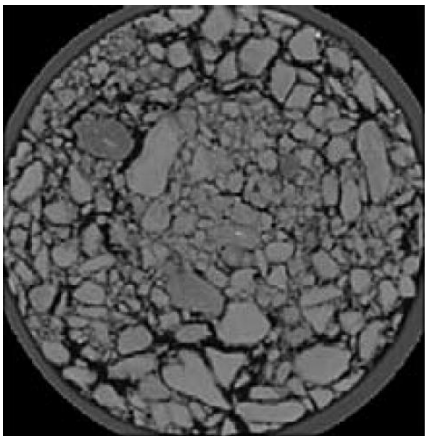


Figura 4-5 - Tomografia computerizzata di un provino di c.b. [23]

La loro teoria, confermata in laboratorio da Masad e Tashman anche per i conglomerati bituminosi, si fonda sulle seguenti ipotesi: il materiale possiede un asse di simmetria parallelo alla direzione di applicazione della forza; gli assi maggiore e minore dell'insieme di particelle si dispongono in direzione ortogonale e parallela alla direzione del carico. Tali ipotesi hanno consentito di formulare il

tensore microstrutturale F_{ij} come funzione di un parametro microstrutturale Δ, che quantifica l'anisotropia media dell'orientamento degli aggregati lungo le sezioni trasversali investigate.

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1-\Delta}{3+\Delta} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1+\Delta}{3+\Delta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1+\Delta}{3+\Delta} \end{bmatrix} \tag{4-21}$$

$$\Delta = \frac{1}{M}[(\sum_{k=1}^{M} \cos 2\theta_k)^2 + (\sum_{k=1}^{M} \mathrm{sen} 2\theta_k)^2]^{\frac{1}{2}} \tag{4-22}$$

Con θ_k si indica l'orientamento dell'asse maggiore del singolo aggregato, variabile da -90° a +90°, ed M corrisponde al numero totale degli elementi presenti nell'immagine 2D (Figura 4-6); il vettore magnitudine varia da zero (materiale isotropo) a uno, per un materiale dotato di completa anisotropia trasversale.

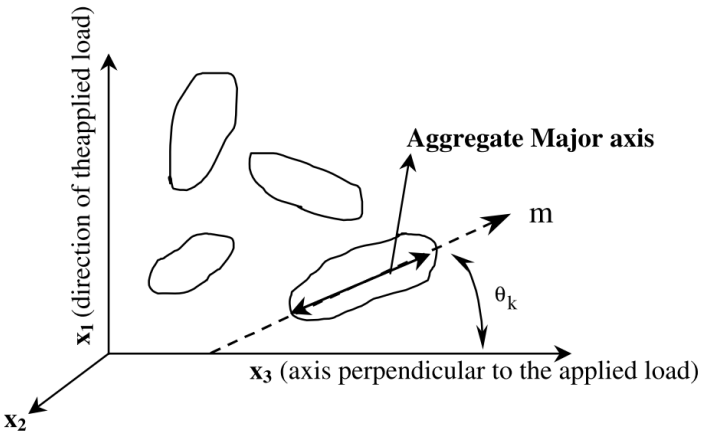


Figura 4-6 - Orientamento delle particelle nella sezione di un materiale granulare[23]

Per determinare il tensore della velocità di deformazione visco-plastica $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$ Tashman ha formulato la seguente relazione valida nel caso di c.b. sottoposto a compressione triassiale.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \Gamma\langle\phi\,(f)\rangle.\ \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \tag{4-23}$$

$$\langle \emptyset(f) \rangle = \begin{Bmatrix} 0 & , \ \phi(f) \leq 0 \\ \phi(f) & , \ \phi(f) > 0 \end{Bmatrix} \tag{4-24}$$

Dove Γ è un parametro di fluidità, g è la funzione potenziale viscoplastico e ϕ è la funzione di scorrimento viscoplastico.

La funzione di scorrimento viscoplastico è stata ottenuta modificando opportunamente l'equazione Drucker-Prager per includere l'anisotropia dei vuoti intergranulari e delle fessurazioni. Tale modifica ha quindi comportato l'introduzione dei parametri di anisotropia Δ e danno ξ all'interno delle equazioni come segue:

$$f = \sqrt{\bar{J}_2^e} - \alpha \bar{I}_1^e - \kappa \tag{4-25}$$

$$\bar{I}_1^e = \frac{\left[\sigma_{kk} + \lambda\sqrt{24}\left(\frac{\Delta}{3+\Delta} F'_{ij}\sigma_{ij}\right)\right]}{1-\xi} \tag{4-26}$$

$$\bar{J}_2^e = \frac{\left[\frac{1}{2} S_{ij}S_{ij} + \mu\sqrt{24}\left(\frac{\Delta}{3+\Delta}\right) F'_{kj} S_{ij} S_{jk}\right]}{(1-\xi)^2} \tag{4-27}$$

Dove α rappresenta un parametro di attrito interno tra gli aggregati, κ un parametro sulla proprietà coesiva del legante, λ e μ sono parametri di anisotropia per il confinamento e la tensione di taglio, σ_{ij} e S_{ij} sono il tensore degli sforzi di Cauchy ed il corrispondente tensore deviatorico. Assumendo una legge di potenza N-esima per la funzione di scorrimento viscoplastico e sostituendo la (4-25) nella (4-24) si ottiene:

$$\langle \phi(f) \rangle = \begin{cases} 0, & nessuna\ def.viscoplastica\ \sqrt{\bar{J}_2^e} - \alpha \bar{I}_1^e - \kappa \leq 0 \\ \left[\sqrt{\bar{J}_2^e} - \alpha \bar{I}_1^e - \kappa\right]^N, & def.viscoplastica\ \sqrt{\bar{J}_2^e} - \alpha \bar{I}_1^e - \kappa > 0 \end{cases} \tag{4-28}$$

La funzione potenziale viscoplastico g, avente struttura simile alla funzione f, è espressa come segue:

$$g = \sqrt{\bar{J}_2^e} - \beta \bar{I}_1^e - c \tag{4-29}$$

Il coefficiente β è rappresentativo dell'ingranamento degli aggregati. In ogni caso questo coefficiente sembra essere inferiore rispetto ad α per i materiali granulari[23], come mostrato in Figura 4-7.

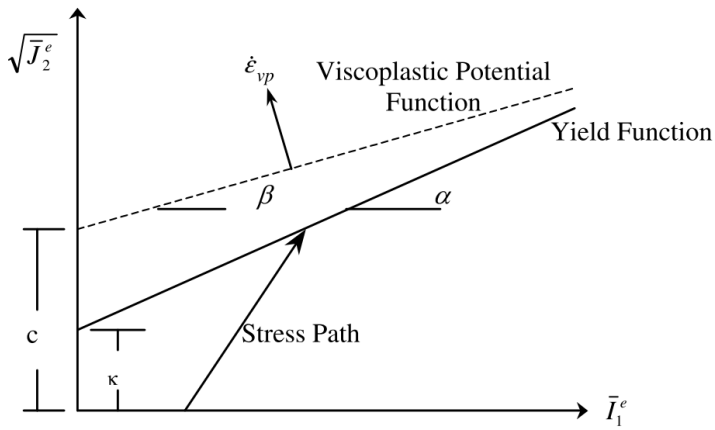


Figura 4-7 - Funzioni Drucker-Prager modificata e potenziale visco-plastica[23]

4.2.5 Modelli viscoelastoplastici

I modelli viscoelastoplastici considerano la contemporaneità delle componenti elastica, plastica, viscoelastica e viscoplastica che genericamente definiscono la risposta complessiva del conglomerato bituminoso. Perl ha proposto un modello costitutivo per individuare questi singoli contributi, eseguendo lo studio su provini sottoposti a test ciclici di creep monoassiale, per diversi livelli di carico ed alla temperatura di 25°C, mantenuti costanti durante le prove[24]. I risultati hanno evidenziato la presenza di aliquote di deformazione dipendenti dal tempo ed altre indipendenti: le deformazioni viscoelastica ε_{ve} e viscoplastica ε_{vp} appartengono al primo gruppo, mentre quelle elastica ε_e e plastica ε_p al secondo. La deformazione totale ε_t è quindi definita come sommatoria delle singole aliquote:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{\mathrm{ve}} + \varepsilon_{\mathrm{vp}} \tag{4-30}$$

Osservando il diagramma della deformazione $\varepsilon(t)$ di un provino soggetto ad un carico ciclico di intensità costante, mostrato in Figura 4-8, si nota quanto segue: a $t_0=0$ si sviluppano istantaneamente le aliquote di deformazione elastica e plastica; nell'intervallo t_0-t_1 si manifesta il fenomeno del creep, composto dalle aliquote di deformazione viscoelastica e viscoplastica; al termine dell'applicazione del carico nell'istante t_1 si ha l'immediata restituzione della sola deformazione elastica reversibile;

nell'intervallo t_1-t_2 si ha uno scarico tensionale con recupero della deformazione viscoelastica; infine, nell'istante t_2 la deformazione residua è la somma delle aliquote irreversibili plastica e viscoplastica.

L'entità della componente viscoplastica irreversibile è legata al tempo di applicazione del carico e dal rapporto tra la durate delle fasi di carico e scarico, mentre l'aliquota plastica irreversibile è proporzionale alla sola intensità della forza. Le aliquote di deformazione elastica e viscoelastica sono anche dipendenti dall'intensità della forza; la prima secondo una legge lineare e la seconda con una legge in parte non lineare [25].

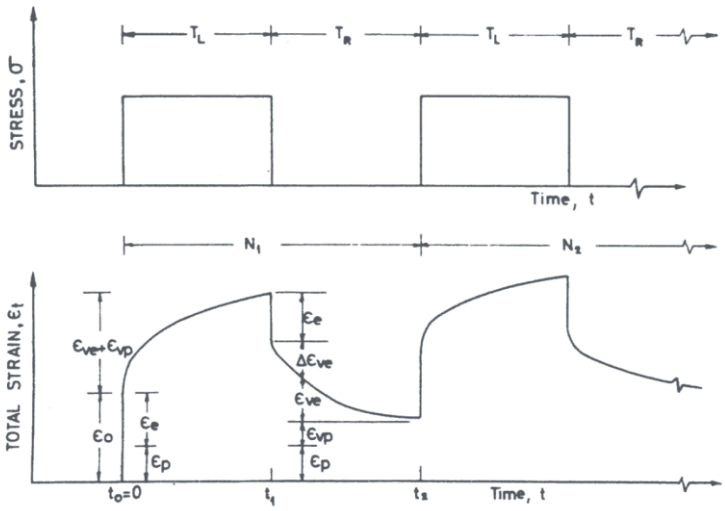


Figura 4-8 – Schema rappresentativo delle aliquote di deformazione[24]

Lu e Wright hanno proposto un modello costitutivo per esprimere le diverse aliquote di deformazione per un c.b. soggetto a una prova ciclica di creep monoassiale all'N-esimo ciclo, come segue[26]:

$$\varepsilon_e = \frac{1}{E}\,\sigma \tag{4-31}$$

$$\varepsilon_{ve} = A(\sigma)\cdot\ t^{\alpha} = A\cdot\sigma^{h}\cdot t^{\alpha} \tag{4-32}$$

$$\varepsilon_{vp} = B(\sigma)\cdot\ f(N)\cdot t^{\beta} = \beta\cdot\ \sigma^{\omega}\cdot\ f(N)\cdot\ t^{\beta} \tag{4-33}$$

$$f(N) = N^{b} - (N-1)^{\beta} \tag{4-34}$$

Dove A, B, h, ω, E, α, b e β sono constanti empiriche ad una data temperatura, t è tempo di applicazione della forza e σ il livello

tensionale. Come si può notare la deformazione plastica ε_p non è presente poiché è considerata come parte integrante di quella viscoplastica ε_{vp} dipendente, secondo la funzione *f*, dal numero N dei cicli di carico.

Nel caso di una modello a più dimensioni le aliquote di deformazione si modificano come segue:

$$\{\varepsilon_e\} = [C] \cdot \{\sigma\} \tag{4-35}$$

$$[C] = \frac{1}{E}\begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ & & & & 2(1+\nu) & 0 \\ & & & & & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \tag{4-36}$$

$$\{\varepsilon_{ve}\} = A \cdot t^{\alpha} \cdot E \cdot [C] \cdot \{\sigma^h\} \tag{4-37}$$

$$\{\sigma^h\} = \left\{\sigma_X^h \sigma_Y^h \sigma_Z^h \tau_{XY}^h \tau_{YZ}^h \tau_{ZX}^h\right\}^T \tag{4-38}$$

$$\left\{\dot{\varepsilon}_{vp}\right\} = \gamma \cdot \langle\phi(F)\rangle \cdot \frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}} \tag{4-39}$$

$$F(\{\sigma\}, \kappa) = f(\{\sigma\}, \kappa) - y(\kappa) = 0 \tag{4-40}$$

dove γ è il parametro di fluidità associato al tempo di carico e $\langle\phi(F)\rangle$ rappresenta la funzione di scorrimento viscoso, ovvero l'entità della variazione della deformazione viscoplastica. La funzione F denota il criterio generale di scorrimento che dipende dallo stato tensionale e dal parametro κ dipendente dalla storia di incrudimento.

4.3 Modellazione di materiali eterogenei

Le informazioni che possibile ottenere da un'analisi "virtuale" del c.b., condotta al fine di simulare il comportamento complessivo della miscela, sono decisamente influenzate dalla qualità con la quale la stessa è stata modellata. Allo stato attuale, i provini numerici di un c.b. sono generati con l'ausilio di diverse tecniche di "*packing*", le quali adottano questa denominazione perché, per l'appunto, sono

metodologie sviluppate per riprodurre la fase di "compattazione" del materiale. Sulla scorta di tali considerazioni, molti ricercatori hanno perseguito l'obiettivo di ricostruire numericamente gli elementi del c.b. (aggregati, bitume e vuoti), con un sufficiente livello di dettaglio tale da rispettare la mutua dislocazione degli aggregati che, notoriamente, ha una notevole influenza sulle caratteristiche fisiche e meccaniche della miscela. La dimensione degli aggregati per uso stradale, in particolare, è molto varia: il diametro delle particelle è generalmente compreso in un intervallo tra 16.0 mm e 0.075 mm. A completare il fuso granulometrico vi è un'ulteriore frazione al di sotto di quest'ultima soglia, il filler.

Se si considera un campione di c.b. sufficientemente rappresentativo della sua eterogeneità (le dimensioni dei provini sono generalmente scelte in tal senso), il numero di particelle di piccolo diametro è particolarmente elevato, dell'ordine di 10^6, quindi si comprende che è sconveniente, se non praticamente impossibile, utilizzare un modello micromeccanico del c.b. che riproduca l'intero assortimento granulometrico degli aggregati. Se così fosse, si accrescerebbe esponenzialmente il tempo di calcolo senza avere, come contropartita, alcuna informazione degna di nota, ciò a discapito dell'efficienza computazionale.

Essendo, quindi, il c.b. un materiale eterogeneo con frazioni granulometriche di dimensioni molto diversificate, è ormai consolidato nella letteratura scientifica operare alcune approssimazioni nei modelli numerici al fine di ottenere il giusto compromesso tra attendibilità dei risultati e tempi di calcolo ragionevoli.

Inizialmente gli aggregati vengono divisi in due categorie in funzione della loro dimensione: **aggregati grossi** (*coarse aggregate*) e **aggregati fini** (*fine aggregate*). Il filler, ovvero l'ulteriore frazione fina al di sotto di 0.075 mm di diametro, è considerato indistintamente agli aggregati fini. Successivamente si assume che aggregati fini e legante bituminoso siano modellati come un unico materiale dalle caratteristiche uniformi denominato **mastice di bitume** (*asphalt mastic*).

In tal modo, attraverso un'opportuna calibrazione delle caratteristiche meccaniche del mastice di bitume, si può procedere all'analisi del c.b., inteso come sistema multifase costituito da aggregati grossi e mastice di bitume.

Sulla scorta di quanto esposto, occorre definire il valore di diametro che discrimina aggregati grossi da aggregati fini. Diversi sono stati i valori di soglia ricavati nella letteratura attraverso analisi numeriche e corroborate anche dall'evidenza sperimentale: in uno studio a due dimensioni finalizzato a predire il modulo del c.b., You and Buttlar [27] considerano una soglia pari a 2.36 mm, mentre, per il medesimo fine, Li and Metcalf [28] la innalzano ad un valore di 4.75 mm.

Nella letteratura più recente è possibile trovare degli algoritmi che consentono di modellare le due fasi del sistema aggregati-bitume: la ricerca di Yin et al. [29] predilige l'utilizzo di aggregati sferici a 32 facce, "compattati" tramite un algoritmo di arrangiamento della posizione che prevede forze repulsive tra gli aggregati (per facilitare l'algoritmo di perturbazione vengono utilizzati degli artifizi numerici per variare il volume degli aggregati, prima in riduzione, poi in aumento); Yang et al. [30], pur non cambiando sostanzialmente la tecnica di compattazione, procedono variando la forma degli aggregati, considerandoli ellissoidici; altri ancora, come Xu et al. [31], per "compattare" il provino pongono casualmente i centroidi dell'aggregato al suo interno e scelgono i diametri in modo tale da rispettare la mutua distanza tra gli aggregati stessi, che in questo caso sono modellati con forme poliedriche casuali con un numero limitato di facce.

Dalla Figura 4-9 si evince che le tecniche di compattazione fin qui riportate, così come i risultati del modello in termini di rappresentazione grafica del c.b., sono ancora lontane dalla realtà.

Dalle più recenti produzioni scientifiche emerge che anche la scelta della forma degli aggregati ha un ruolo cruciale nella determinazione delle caratteristiche di una miscela. Allo stato attuale, gli aggregati vengono idealizzati in forme geometriche predefinite come sfere [29] o ellissoidi [30] e successivamente discretizzate ed approssimate in poliedri. In realtà, altri tentativi sono stati condotti, nella

discretizzazione degli aggregati, direttamente in poliedri convessi con numero di facce limitato [31], al fine di avvicinarsi il più possibile alla realtà, ma i risultati degli algoritmi, in termini di forma ed eterogeneità, non hanno condotto a risultati soddisfacenti.

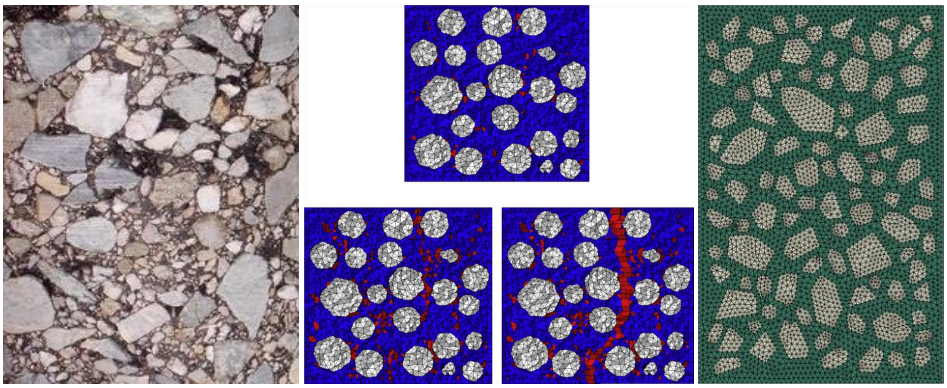


Figura 4-9 - Confronto tra sezione di un provino reale e di due numerici[32],[29]

I modelli numerici atti a riprodurre verosimilmente un materiale multifase sono presenti in una moltitudine di ambiti scientifici e riguardano diverse tipologie di materiale che spaziano dai conglomerati bituminosi ai calcestruzzi in genere e dalle materie plastiche ai biomateriali. Per tale motivo è stata condotta una ricerca ad ampio spettro sul tema in modo tale da poter sfruttare altre conoscenze e trarre spunti di novità da altri campi d'indagine. In questa sede, sia per attinenza alla materia di studio che per brevità di esposizione, si concentrerà l'attenzione solo sui più moderni approcci di modellazione multifase ed in particolare su quelli già applicati direttamente per la rappresentazione del conglomerato bituminoso.

Da un attento studio della letteratura è emerso come non sia ancora stato sviluppato un orientamento univoco ma che, a contrario, siano diversi gli approcci che vengono posti in essere dagli studiosi; infatti se alcuni di essi simulano processi di compattazione [32], [33], altri preferiscono procedere collocando gli aggregati singolarmente nello spazio[29], [31].

Infine è utile ricordare che a fronte degli svantaggi che il metodo sperimentale abbia rispetto a quello puramente teorico, quali i costi elevati e tempi eccessivamente lunghi da dover attendere, esistono dei vantaggi che non devono essere dimenticati (primo fra tutti la tranquillità di operare su di una base empirica). Si conviene, pertanto,

che nessuno dei due filoni può costituire una ricerca a sé stante e che la soluzione ottimale si ha nell'affinamento dei modelli teorici e poi nel concentrare le risorse per validare, od anche confutare, con l'evidenza sperimentalmente i modelli ipotizzati.

4.3.1 Tecniche di modellazione e discretizzazione

Un materiale composito è in un materiale eterogeneo costituito da due o più fasi. Ognuna delle fasi è costituita da un materiale con proprietà fisiche e meccaniche differenti. Solitamente le diverse fasi nel composito sono dosate e collocate in modo tale da ottenere un nuovo materiale avendo come obiettivo il raggiungimento caratteristiche migliori rispetto a quelle singoli materiali che lo costituiscono. Esistono i seguenti tipi di materiali compositi, rappresentati anche in Figura 4-10:

A. Compositi rinforzati con particelle;
B. Compositi rinforzati con fibre;
C. Plastiche rinforzate in fabbricazione;
D. Compositi unidirezionali
E. Compositi laminati
F. Strutture composite a nido d'ape.

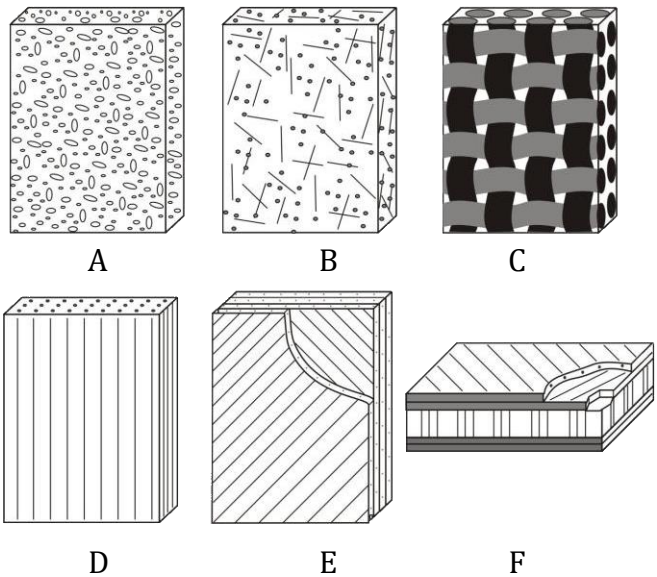


Figura 4-10 - Tipologie di materiali compositi [34]

In questo studio si è focalizzata l'attenzione sui criteri di modellazione dei materiali compositi particellari ed in particolare sul conglomerato bituminoso che, rispetto alla generalità dei materiali di questo tipo, ha una struttura *sui generis*.

Una delle fasi fondamentali per lo studio di un materiale mediante analisi ad elementi finiti è l'astrazione della realtà dalla configurazione fisica della materia ad un corrispondente modello numerico. Tale passaggio riduce inevitabilmente il numero di gradi di libertà del sistema da una quantità infinita, nel continuo, ad una finita nel modello discreto. Questa operazione, nota anche come discretizzazione del dominio di integrazione, consente quindi di idealizzare la struttura al fine di poter condurre un'analisi con il metodo degli elementi finiti ed ottenere una soluzione ingegneristica del problema. La modellazione del materiale composito comporta però una semplificazione della realtà che porta con sé diverse assunzioni e approssimazioni che influenzeranno il risultato finale dell'analisi. Infatti, nonostante lo sviluppo di tecniche numeriche sempre più sofisticate e il rapido potenziamento degli elaboratori elettronici, che consentono di analizzare strutture con un numero di elementi finiti sempre più elevato in tempi sempre più brevi, la discretizzazione del continuo rimane ancora un aspetto critico della modellazione. Tale criticità è dovuta al fatto che le soluzioni numeriche delle analisi fem sono calcolate sulla mesh e quindi sono inevitabilmente dipendenti dalla stessa, tanto che diverse discretizzazioni dello stesso oggetto portano sempre a risultati differenti che possono variare anche fortemente l'uno dall'altro. Da quanto appena esposto si evince che la sensibilità dell'operatore nell'approccio alla modellazione e nella scelta della mesh da adottare gioca un ruolo fondamentale nella definizione del problema.

Preliminarmente ad una trattazione più specifica della modellazione del materiale composito (che verrà esposta nei seguenti capitoli), è utile definire i criteri generali normalmente utilizzati per la rappresentazione degli oggetti nello spazio. A tal proposito è necessario creare una netta separazione tra i materiali compositi che possiedono una struttura ordinata (Figura 4-10 C-D-E-F) da quelli in cui, invece, le fasi non sono disposte secondo un preciso ordine (Figura

4-10 A-B). Infatti, le due diverse configurazioni vengono modellate con tecniche e approcci distinti poiché, nel primo caso, la struttura geometrica da rappresentare è ben definita, quindi facilmente misurabile e riproducibile mentre, nel secondo caso, possono essere condotte solo analisi di tipo statistico che siano sufficientemente rappresentative dei complessi rapporti e della proporzionalità tra le fasi.

In quest'ultimo caso rientra il conglomerato bituminoso poiché è un materiale composito particellare, ovvero una delle sue componenti è la fase solida costituita dagli aggregati. Questi elementi non sono altro che delle "particelle" che possiedono delle caratteristiche geometriche, come forma e dimensione, che non sono sempre facilmente misurabili come non lo è la loro posizione o il loro orientamento.

Prescindendo, solo per il momento, da una visione complessiva del materiale multifase, è utile esaminare come è possibile riprodurre numericamente una singola particella concentrandosi quindi sulle tecniche rappresentazione matematica di oggetti solidi nello spazio a tre dimensioni. Quanto sopra detto può essere realizzato principalmente in due diversi modi:

- volume-based: descrivendo l'oggetto tramite combinazione di più figure geometriche primitive definite per mezzo di pochi parametri. Questa tecnica è denominata anche Constructive Solid Geometry. Le figure primitive sono combinate tra loro mediante operazioni elementari, quali unione, intersezione, differenza, sweep e rotazione;
- voxel-based: descrivendo l'oggetto tramite un insieme porzioni elementari di spazio sono occupate dall'oggetto stesso. Questo approccio si divide in due varianti: Binary Space Partitioning è un metodo che permette di suddividere, in maniera ricorsiva, uno spazio euclideo in insiemi convessi di iperpiani; Voxel-based Enumerative Model è un metodo enumerativo in cui lo spazio tridimensionale è partizionato in piccole porzioni elementari e l'oggetto è rappresentato da un insieme di questi elementi.

Per comprendere immediatamente la differenza sostanziale frale due tecniche si può fare una semplice ma efficace analogia: la modellazione volume-based e quella voxel-based sono nel campo 2D

del tutto simili ad un'immagine vettoriale nel primo caso e ad una raster nel secondo.

Una più completa trattazione delle tecniche su esposte è riportata nei successivi paragrafi.

4.3.1.1 Constructive Solid Geometry

La geometria solida costruttiva (Constructive Solid Geometry) è una tecnica di rappresentazione di oggetti 3D basata sul concetto di volume. Questo approccio modella il volume di un oggetto a partire da una famiglia di figure primitive, ovvero dei solidi geometrici elementari come ad esempio il parallelepipedo, il cilindro, la sfera, il cono, il toro.

Per poter ottenere forme complesse a partire da questi volumi elementari si procede per step costruendo l'oggetto tramite una serie di operazioni booleane, che derivano dalle classiche operazioni insiemistiche: unione (somma), differenza (sottrazione), intersezione.

Il procedimento che porta ad ottenere il solido finale può essere organizzato in uno schema albero, come rappresentato in Figura 4-11: ogni ramo rappresenta un solido e ad ogni nodo corrisponde un'operazione booleana, mentre in cima troviamo l'oggetto finale.

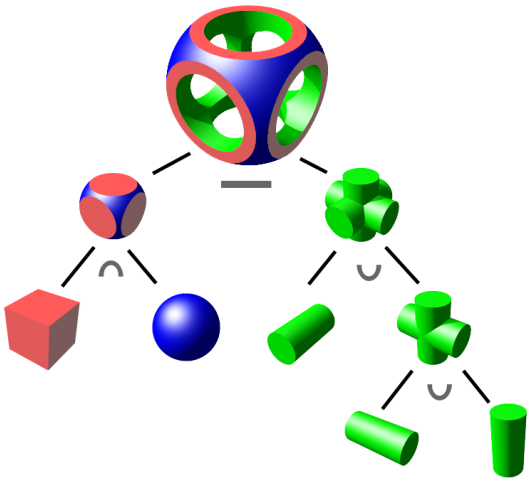


Figura 4-11 Schema ad albero della CSG

Questo è quanto avviene per la definizione del volume geometrico, ma per poter eseguire un'analisi è necessaria una successiva operazione di discretizzazione. Quando si adopera la Constructive

Solid Geometry la creazione della mesh è generalmente demandata ad algoritmi numerici insiti in software dedicati all'uopo o anche negli stessi software di modellazione ad elementi finiti.

Gli algoritmi "classici" utilizzano tecniche di mesh standard e strutturate di tipo top-down, perché legate direttamente alla geometria del modello in modo che la mesh risultante riempia e si adatti alla geometria stessa. Questa metodologia porta con sé però il deficit di poter gestire la mesh solo attraverso dei parametri imposti sul contorno della regione dalla quale viene generata, senza alcuna possibilità di controllo locale. Utilizzando tali applicativi, infatti, l'operatore non controlla direttamente la mesh ma si limita a definirne alcune proprietà fondamentali quali, a titolo esemplificativo, la tipologia dell'elemento finito, la dimensione massima di un elemento o il numero di elementi da modellare al confine di una determinata regione geometrica. In tal caso l'operazione più delicata, che viene generalmente condotta manualmente, consiste proprio nella definizione di queste regioni geometriche. È opportuno evidenziare come nel caso in cui l'oggetto da rappresentare abbia una forma complessa o eccessivamente articolata, tali codici di calcolo mostrano la loro debolezza che si traduce in un'inevitabile riduzione di qualità della mesh, come si può notare in Figura 4-12.

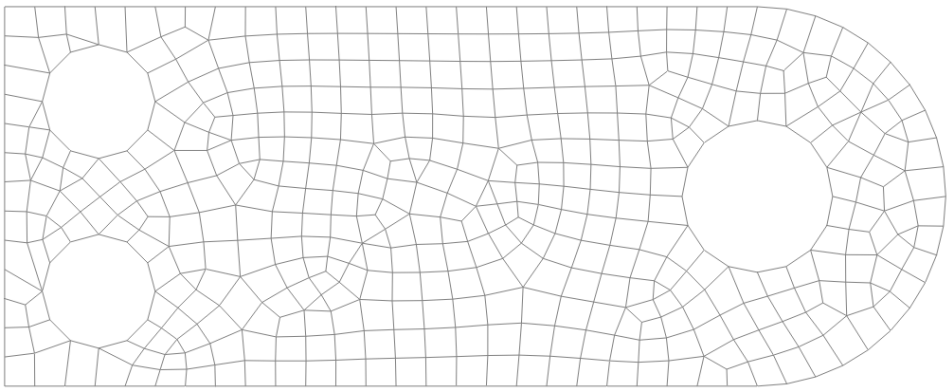


Figura 4-12 Risultato di un algoritmo di mesh automatica

Per scongiurare le conseguenze negative di questi algoritmi che soffrono di generalità in particolari applicazioni, si preferisce scomporre o partizionare oggetti complessi, sfruttando eventualmente alcune simmetrie, per ottenere forme pressoché elementari alle quali vengono associati parametri della mesh

personalizzati. Le operazioni scomposizione geometrica vengono usualmente compiute dall'operatore sfruttando gli stessi criteri della Constructive Solid Geometry. Un comodo esempio dal quale si possono evincere i diversi approcci e tecniche per generare la mesh di un determinato oggetto è dato dal cerchio, rappresentato in Figura 4-13. In particolare, solo nel cerchio corrispondente alla lettera c) viene sfruttata la simmetria doppia e, inoltre, nella zona interna vi è una zona circolare in cui sono stati imposti solo elementi triangolari. In tal modo la scomposizione in geometrie semplici, ottenuta con quattro settori circolari e quattro settori di corone circolari, consente agli algoritmi su menzionati di generare una mesh correttamente.

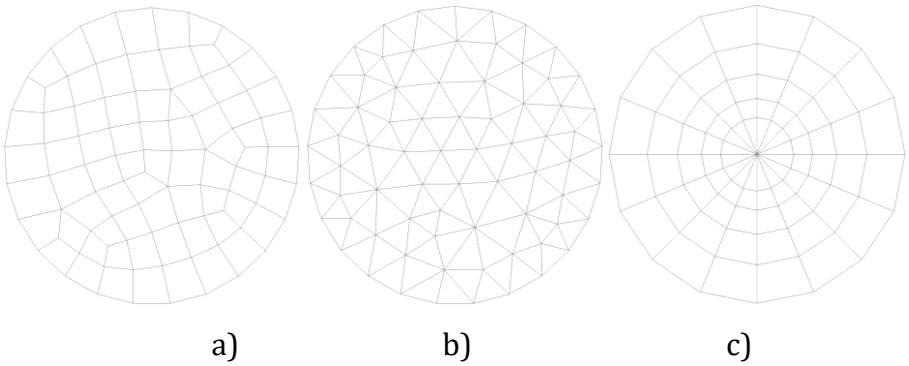


Figura 4-13 - Diversi mesh di un cerchio: a) quad dominated; b) tri; c) quad e tri partitioned.

Queste tecnica è estremamente valida e consigliata nel caso in cui il modello rappresenti la geometria ben nota di materiale omogeneo. Tuttavia, nel caso in cui si modella un materiale composito eterogeneo senza una apparente struttura, la tecnica della Constructive Solid Geometry può risultare poco conveniente o eccessivamente approssimativa. Oltretutto, gli algoritmi per l'inserimento di più oggetti in uno stesso dominio possono risultare macchinosi, inefficienti se non, per certi versi, inattuabili [31].

4.3.1.2 Voxel based modeling

La tecnica di modellazione basata sui voxel può essere denominata anche Modellazione Enumerativa per occupazione volumetrica, ovvero un approccio in cui un oggetto viene rappresentato elencando delle finite porzioni di volume che lo stesso occupa. Queste porzioni elementari di spazio sono dette "volume elements" oppure "volumetric

picture element", o in forma contratta, "voxel" è rappresentano proprio l'unità elementare per la definizione di un volume. Il voxel rappresenta per le tre dimensioni quanto è il pixel per le due dimensioni. Sono dunque possibili due interpretazioni del termine voxel, in base all'utilizzo: un piccolo cubo (o anche una forma non regolare, dando una interpretazione estensiva della modellazione, cfr. par. 6.1) con particolari proprietà in uno spazio più grande; un punto (campione) in una griglia 3D ad intervalli regolari.

Per la rappresentazione di un oggetto deve essere preventivamente definito un dominio di modellazione che viene suddiviso in porzioni elementari di volume, ovvero dei "voxel" di forma più o meno regolare, e ad ognuna di esse viene associato un identificativo. L'insieme di questi elementi rappresenta un dataset volumetrico, ovvero una griglia tridimensionale discreta.

Come già anticipato all'inizio del paragrafo, un oggetto solido può essere immaginato come un raggruppamento di queste porzioni di spazio e, pertanto, è necessario chiarire che la definizione geometrica dell'oggetto è intrinsecamente limitata alla dimensione caratteristica del voxel e alla sua forma, come rappresentato in Figura 4-14.

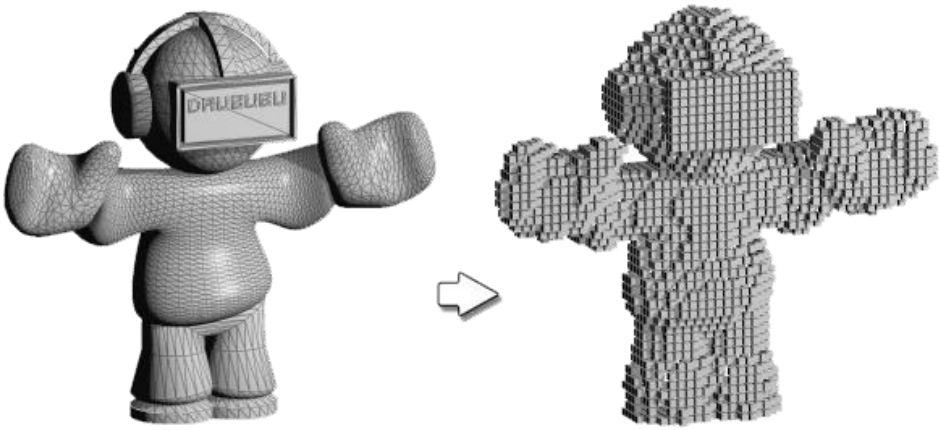


Figura 4-14 - Esempio di discretizzazione con voxel[3]

Infatti, così come avviene per l'acquisizione di un segnale in 1d o per la scansione di un'immagine in 2d, anche nel caso 3D si

[3] Marian Krychkovskyy, *I voxel contro i poligoni*, 2016 - http://www.ilsaggiatore.org/2016/03/i-voxel-contro-i-poligoni

propongono problemi campionamento ottimale e di aliasing, ovvero problematiche che influenzano il grado di approssimazione del modello. Questo approccio ha il beneficio di associarsi perfettamente alle tecniche di “volume rendering”. Infatti, i voxel vengono usati come dei sistemi per visualizzare geometrie o fenomeni particolari. Questa circostanza è dimostrata dal fatto che la visualizzazione volumetrica tramite voxel viene impiegata ampiamente in ambito medico, utilizzando i dati tridimensionali provenienti dalle Tomografie computerizzate (TC), e dalle risonanze magnetiche (RM), i modelli generati in tale modo rientrano nella categoria della modellazione da "scansione tridimensionale". I voxel vengono anche utilizzati nell'ambito della animazione tridimensionale per alcuni tipi di simulazione complessa, come quella degli effetti gassosi, atmosferici e per le esplosioni, similmente possono venire impiegati per realizzare i materiali liquidi e fluidi, come acqua, lava, ecc. mediante motori di generazione particellare, in questo caso il loro l'utilizzo rientra nell'ambito della "modellazione procedurale". Da quanto detto si comprende che l'ambito di utilizzo dei voxel comprende quasi esclusivamente forme e strutture di tipo organico, naturale o immaginario, ma non di tipo geometrico.

Operativamente, le diverse fasi di cui si compone la procedura di discretizzazione mediante modelli enumerativi sono le seguenti:

- definizione di una griglia regolare di celle;
- assegnazione di un valore *True* alle celle che contengono materiale, e *False* a quelle che non lo contengono;
- rappresentazioni di ogni cella mediante le coordinate di un singolo vertice.

4.3.2 Modelli FEM

La Metodologia di analisi degli Elementi Finiti (FEM - *Finite Element Method*) è una delle tecniche numeriche più diffuse per la soluzione approssimata di problemi ingegneristici. L’approssimazione anzidetta consiste nel ridurre i problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali (PDE - *Partial Differential Equation*) a un sistema di equazioni algebriche[2]. Il concetto alla base del metodo FEM è la discretizzazione del dominio di calcolo in una griglia (mesh) composta da primitive (elementi finiti) per le quali la soluzione

del problema è nota ed è assunta come combinazione lineare di funzioni polinomiali dette di base o di forma. L'accuratezza della soluzione numerica trovata è legata al grado del polinomio scelto e, quindi, al numero di coefficienti che identifica la soluzione. Si ipotizza inoltre che lo stato tensionale di un punto interno ad un elemento sia funzione degli spostamenti nodali relativi dell'elemento stesso[10].

Le fasi essenziali che caratterizzano un'analisi FEM sono le seguenti:

- **discretizzazione del dominio**: frazionamento in un numero finito di elementi finiti di forma codificata (per domini 2D triangoli e quadrilateri, per domini 3D tetraedri e esaedri), definiti da un numero fissato di nodi condivisi tra gli elementi adiacenti (Figura 4-15);

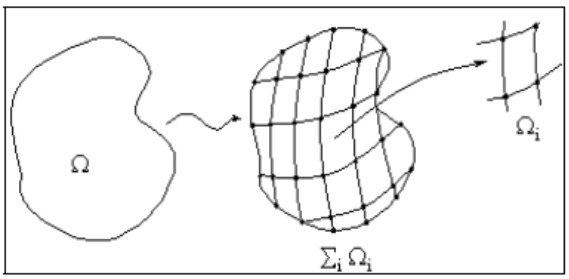


Figura 4-15 - Suddivisione del dominio Ω in sottodomini Ωi [10]

L'accuratezza del modello e, conseguentemente, dei risultati attesi dipende sia dall'intervallo di suddivisione utilizzato per la mesh sia dalla conformazione della stessa. L'errore commesso in fase di calcolo, pertanto, è relazionato alla variabilità spaziale della soluzione (non nota ovviamente a priori) che generalmente, per geometrie complesse o sforzi concentrati, porta a realizzare mesh raffittite e non uniformi.

- **approssimazione locale**: lega gli spostamenti generici interni all'elemento a quelli nodali. Per ogni elemento la funzione incognita u_i^e (e.g. spostamento) si ipotizza approssimata come serie di una funzione nodale u_i^j secondo la seguente la forma:

$$u_i^e = \sum_{j=1}^{M} N_{ij} \cdot u_i^j \qquad (4\text{-}41)$$

dove N_{ij} sono funzioni di base (o di forma) ed M è il numero degli elementi. Le funzioni di base giocano un ruolo cruciale poiché costituiscono il polinomio che approssima il valore esatto degli spostamenti e, quindi, influenzano la convergenza della soluzione;

- **assemblaggio matriciale e soluzione dell'equazione globale**: le equazioni differenziali alle derivate parziali del problema sono convertite in un sistema di equazioni algebriche che assumono la seguente forma:

$$\sum_{i=1}^{N}\left[K_{ij}^{e}\right].\{u_i^e\} = \sum_{i=1}^{N}(f_i^e) \tag{4-42}$$

dove:

- $\left[K_{ij}^{e}\right]$: matrice di rigidezza, a bande e simmetrica;
- $\{u_{\mathrm{j}}^{\mathrm{e}}\}$: vettore degli spostamenti nodali o di una generica variabile incognita;
- $\{f_i^e\}$: vettore delle forze interne all'elemento, congruente con le condizioni iniziali e al contorno del problema.

Il largo impiego della metodologia FEM, confermato anche dalla vasta disponibilità di software in commercio, è da attribuire principalmente all'elevata flessibilità del metodo stesso che è in grado di rappresentare la disomogeneità e l'anisotropia dei materiali oltre a complesse condizioni al contorno anche dinamiche.

Il principale limite di questa tecnica numerica riguarda l'incapacità di riprodurre il comportamento di sistemi soggetti a rottura, ovvero di separazione reciproca degli elementi finiti, poiché, nella sua versione classica, non contempla la discontinuità degli spostamenti, propria di un modello continuo. A tal proposito, negli ultimi decenni, sono state studiate molte tecniche di modellazione del problema, che nascono come naturali evoluzioni dell'originario metodo FEM proposto da Ray W. Clough negli anni '60. Tra tali metodi si annoverano le tecniche di remeshing automatico, la modellazione con Extended Finite Element (cfr. par. 5.6.1) e con elementi coesivi (cfr. par. 5.6.2).

4.3.3 Modelli DEM

La modellazione ad Elementi Distinti Particellari (DEM – *Discrete Element Method)* permette di rappresentare la natura granulare del conglomerato mediante particelle indeformabili con forma circolare in 2D e sferica in 3D; tali elementi si scambiano forze e momenti per mezzo di una legge costitutiva definita nei punti di contatto, che trasforma le grandezze cinematiche in dinamiche. Questo modelli sono

di largo uso per lo studio della risposta macroscopica delle rocce e microscopica del materiale granulare non legato

Il DEM rappresenta l'ammasso roccioso con elementi discreti tra loro interagenti tramite leggi costitutive di attrito e rigidezza. Così per come è stato pensato, gruppi di elementi discreti sono in grado di distaccarsi dalla loro originaria sede compiendo traslazioni e rotazioni. Con tale approccio Cundall pone negli anni '70 le basi teoriche del DEM, tracciando l'andamento delle forze che si sviluppano nei punti di contatto (Figura 4-19) ed i movimenti dei singoli elementi e formulando il problema ingegneristico mediante l'implementazione dell'analisi per cycle, delle equazioni non lineari del moto di Newton e di quelle che relazionano i contatti tra le particelle.

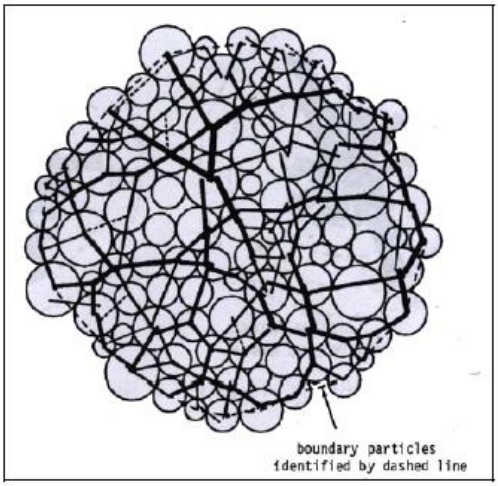


Figura 4-16 - Distribuzione delle forze di contatto [12]

Nelle evoluzioni del DEM, in particolare con il software PFC, è possibile modellare ciascun aggregato con un insieme di particelle legate reciprocamente Figura 4-17.

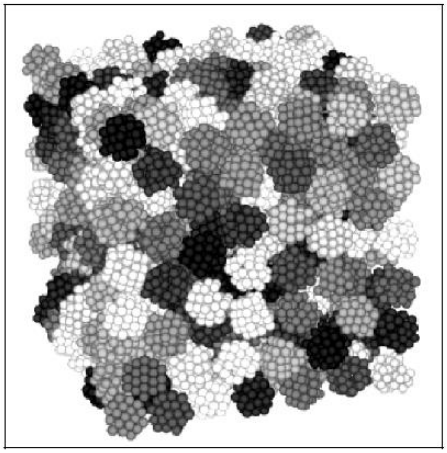


Figura 4-17 - Modello con cluster per la schematizzazione dei grani di sabbia [12]

Nonostante il metodo DEM sia in uso da oltre quarant'anni e siano stati sviluppati i codici di calcolo molto potenti quali il PFC, non si assiste ancora ad un utilizzo esteso di tale metodo per l'analisi del comportamento meccanico del c.b. al fine di comprendere le possibili correlazioni tra i fenomeni di natura microscopica e la corrispondente risposta macroscopica.

4.3.4 Report sullo stato dell'arte

Vengono di seguito riportati alcuni degli articoli studiati durante il periodo di ricerca. Come si avrà modo di osservare dalla lettura dei brevi commenti che li accompagnano, il minimo comune denominatore resta sempre lo studio del conglomerato bituminoso ma poi ogni singolo articolo si caratterizza e si differenzia dall'altro, in modo più specifico, per il particolare oggetto di studio, focalizzandosi ora su specifiche prove, ora su talune peculiarità del materiale:

"Yin, A., Yang, X., Zhang, C., Zeng, G., & Yang, Z. (2015). Three-dimensional heterogeneous fracture simulation of asphalt mixture under uniaxial tension with cohesive crack model. Construction and Building Materials, 76, 103–117." DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.11.065.

Gli aspetti e le metodologie studiate in questo articolo sono diverse: in primis, ci si occupa della modellazione degli aggregati in

poliedri sferici a 32 facce; successivamente si adopera un algoritmo per l'allocazione di tali elementi all'interno del provino (Figura 4-20); infine il mastice di bitume è modellato con dei tetraedri tra le cui facce si inserisce un elemento coesivo di spessore nullo definendo un criterio di danno che contempli le tre componenti normali e tangenziali ad una faccia.

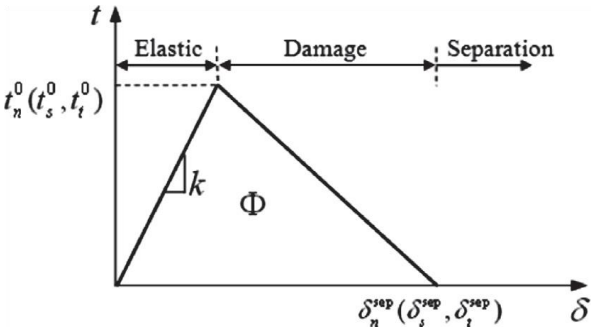


Figura 4-18 Relazione tensione-spostamento

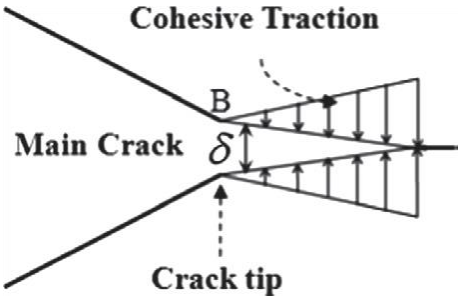


Figura 4-19 modellazione di una zona coesiva

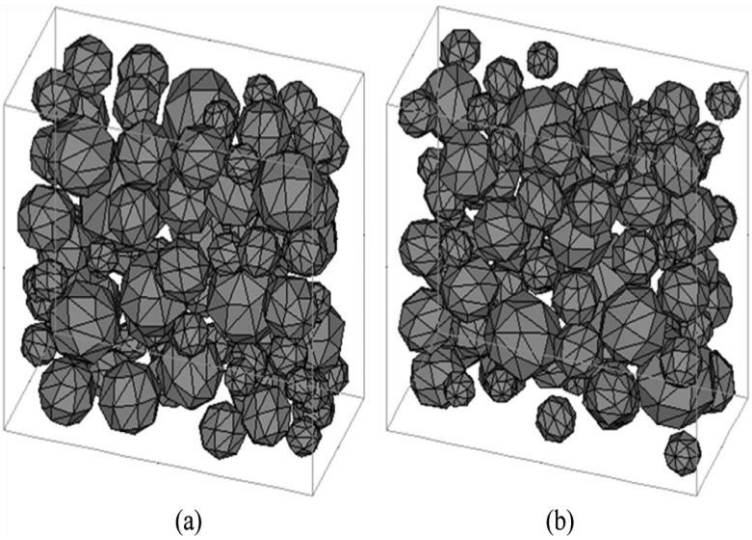


Figura 4-20 Provino in 3D

Per la calibrazione dei parametri sono utilizzati i dati sperimentali ricavati da Kim e Buttlar [35]; il modello 3D viene validato con una prova a tensione uniassiale utilizzando il software Abaqus; la propagazione della frattura avviene negli elementi coesivi nel mastice di bitume e, principalmente, nelle interfacce bitume-bitume in vicinanza agli aggregati; si notano gli stadi di microfessurazione, coalescenza, macrofessurazione e rottura.

In particolare si evince che la rottura avviene dove gli aggregati sono più vicini tra loro (Figura 4-21).

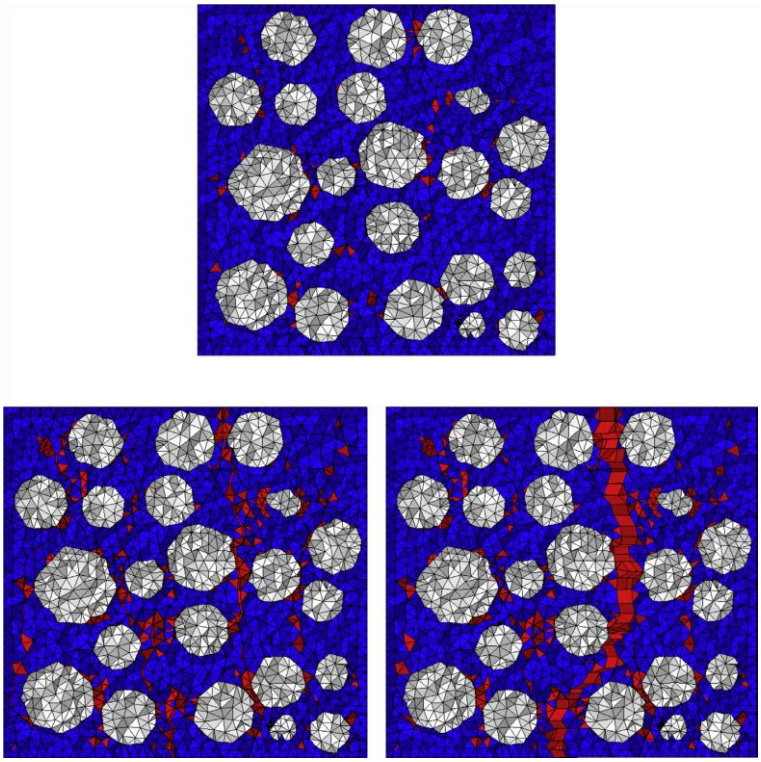


Figura 4-21 Evoluzione di una fessura per differenti stadi di carico

Una specifica attenzione viene poi riservata alla dimensione degli aggregati: maggiore è la dimensione, minore è la resistenza complessiva.

Se per un verso non si apprezzano variazioni di resistenza o energia dissipata al variare dei parametri meccanici all'interfaccia bitume-inerti, per altro, ci sono importanti variazioni intervenendo sul legame bitume-bitume. Infine, si evince che il picco di carico si ottiene nella fase di nucleazione delle microfessure e che la forma ed il

percorso di rottura è indipendente dall'energia e dalla forza di coesione.

"Yin, A., Yang, X., Zeng, G., & Gao, H. (2014). Fracture simulation of pre-cracked heterogeneous asphalt mixture beam with movable three-point bending load. Construction and Building Materials (Vol. 65).Elsevier Ltd." DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.119.

In questo articolo si valuta la disposizione degli aggregati quale variabile capace di influenzare la frattura del conglomerato.

Per chiarezza espositiva, anche in questo caso si procede tramite elencazione: il conglomerato è modellato con aggregati grossi immersi i in un mastice di bitume; utilizza un algoritmo per generare una distribuzione random, applicando un fattore di restringimento per evitare conflitti tra gli aggregati; nella terza fase dell'algoritmo applica una perturbazione tenendo in considerazione le forze repulsive degli aggregati per una loro ridistribuzione; utilizza un modello elastico lineare per gli aggregati, per il mastice bituminoso invece un legame coesivo-*softnening* sia per la tensione normale che tangenziale e crea una variabile di danno per esaminare la concomitanza tra meccanismi di formazione della frattura; eseguendo diverse prove, simulando una tre punti a flessione (Figura 4-22), si deduce che la distribuzione locale degli aggregati può cambiare il percorso della frattura, ma ha solo una debole influenza sulla direzione complessiva della stessa.

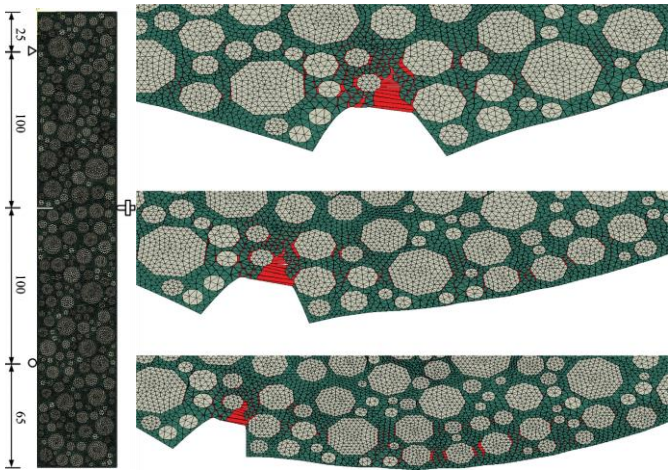


Figura 4-22 Configurazione della prova che mostra l'eterogeneità della mesh

"Yin, A., Yang, X., Yang, S., & Jiang, W. (2011). Multiscale fracture simulation of three-point bending asphalt mixture beam considering material heterogeneity. Engineering Fracture Mechanics, 78(12), 2414–2428." DOI:10.1016/j.engfracmech.2011.06.001.

In questo studio l'autore, al fine di ottimizzare i tempi di calcolo, conduce un'analisi multiscala di un conglomerato bituminoso (Figura 4-23).

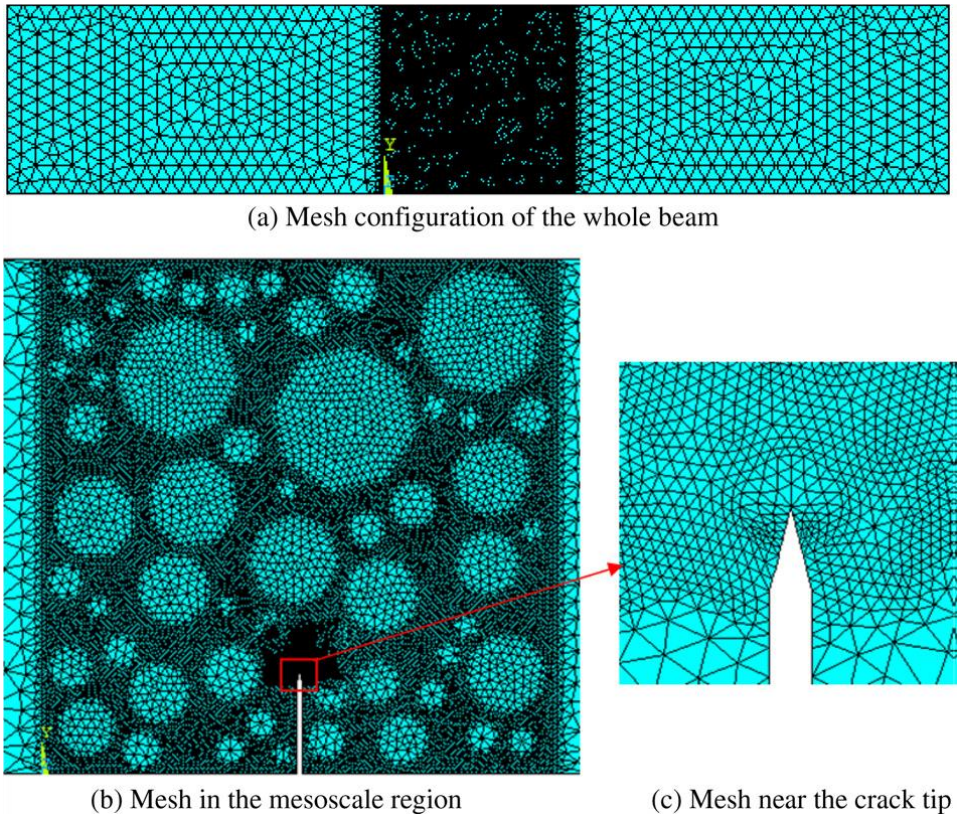


Figura 4-23 Configurazione della mesh di un provino soggetto a 3PB con una cricca centrale

L'analisi sperimentale viene eseguita anche mediante tomografia ma è molto costosa. Nell'articolo si valuta l'effetto della distribuzione degli aggregati sul comportamento a frattura. La scelta del diametro limite dell'aggregato (2.36 mm) che distingue gli aggregati grossi da quelli contenuti nella matrice di asphalt mastic è abbastanza influente. Lo studioso utilizza un algoritmo per determinare casualmente la posizione e il diametro degli aggregati, la mesh viene raffittita nelle aree di potenziale frattura e per determinare le caratteristiche

meccaniche del conglomerato e del mastice esegue delle prove sperimentali: compressione uniassiale e tre punti a flessione.

Per quanto concerne il criterio di frattura, è stabilito un valore limite di trazione in uno specifico tool per la propagazione delle fessure, implementato all'interno del software commerciale Ansys.

Vengono così eseguite diverse prove per determinare il numero ottimale di mesh al fine di trovare il giusto compromesso tra qualità del risultato e tempi di calcolo. L'angolo di formazione della frattura dipende dalla posizione della cricca iniziale e dalla distanza del punto di applicazione del carico.

Il percorso della frattura, su differenti simulazioni numeriche (con diversa disposizione degli aggregati), è mediamente sempre lo stesso e subisce solo delle deviazioni locali dovute alla presenza degli aggregati più grossi.

I valori maggiori di stress tensionale, infine, si ottengono dall'interfaccia bitume-aggregati attorno ai quali avviene la rottura.

"Pramesti, F. P., Molenaar, A. A. A., & Van De Ven, M. F. C. (2013). The prediction of fatigue life based on four point bending test. Procedia Engineering (Vol. 54). Elsevier B.V." DOI:10.1016/j.proeng.2013.03.078.

In questo articolo si cerca di predire la vita utile di una pavimentazione attraverso prove 4PB. I risultati delle prove 4PB sono comparati con il Lintrack (Figura 4-24), una strumentazione per l'analisi di rottura a fatica su scala reale del laboratorio The Road and Railroad Research Laboratory (RRRL) del Delft University of Technology.

Figura 4-24 Lintrack (strumentazione per l'analisi di rottura a fatica su scala reale)

Su quattro sezioni di misura vengono determinate sia la rigidezza che la resistenza a fatica e, successivamente, le costanti di regressione dell'equazione di Arrhenius per trovare la master-curve di rigidezza. La ricerca non mostra buoni risultati poiché ci sono differenze di un ordine di grandezza tra calcolo e sperimentazione, ma comunque la prova FPBT può essere usata per predire la vita utile.

"Liu, Q., Schlangen, E., Van De Ven, M., Van Bochove, G., & Van Montfort, J. (2012). Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test. Construction and Building Materials (Vol. 29). Elsevier Ltd." DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.058.

Questo articolo è completamente incentrato sul valutare healing effect, ovvero l'effetto di autoriparazione delle microfessure nelle miscele bituminose. L'indagine è eseguita sulle strade olandesi che sono realizzate tutte con conglomerati porosi aventi notoriamente una vita utile maggiormente limitata.

Il principale difetto di cui soffre questo tipo di pavimentazione è il ravelling (lo sgranamento degli inerti che si staccano dalla pavimentazione). L'intervento che si studia è l'inserimento della lana di ferro nel mix design così da rendere maggiormente conduttiva la pavimentazione e renderla idonea a ricevere calore per induzione, grazie ad appositi macchinari, al fine di favorire il fenomeno di autoriparazione.

"Xu, R., Yang, X. H., Yin, A. Y., Yang, S. F., & Ye, Y. (2010). A Three-Dimensional Aggregate Generation and Packing Algorithm for Modeling Asphalt Mixture with Graded Aggregates. Journal of Mechanics, 26(2), 165–171."DOI:10.1017/S1727719100003026

L'obbiettivo di questo articolo è simulare la macro-risposta di un conglomerato bituminoso con un sistema a due fasi. La forma degli aggregati per le applicazioni ingegneristiche si può approssimare ad un poliedro convesso. Pertanto si genera un set di aggregati con la seguente procedura: partendo da una circonferenza, seleziona tre

punti sul perimetro, crea un triangolo fondamentale e sceglie casualmente un punto esterno alla superficie per generare un tetraedro; continua a aggiungere punti esternamente alle facce finché l'area di ogni superficie diventa minore di un'area max (il numero totale di facce di un elemento viene limitato a 10).

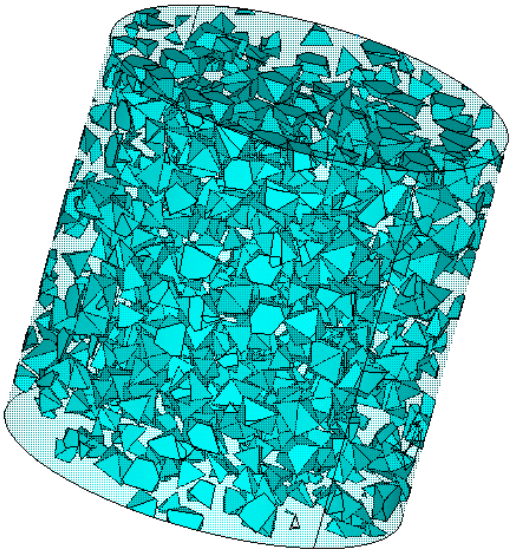


Figura 4-25 Provino con elementi poliedrici

Gli aggregati sono successivamente soggetti ad un giudizio sulla loro affilatezza e vengono registrati in un database. Si crea una regione delle dimensioni di un provino e si generano tanti punti quanti sono gli aggregati. Si prendono gli aggregati più grossi e si associano casualmente a punti generati, passando poi agli aggregati più piccoli. Infine si compie una verifica sulla sovrapposizione di aggregati ed in tal caso gli aggregati sovrapposti vengono sostituiti con altri di minor diametro per ottenere la modellazione finale del provino (

Figura 4-25).

Infine viene condotto un esempio numerico con una prova di creep, utilizzando il modello costitutivo di Burgers per il mastice di bitume.

"Yang, S. F., Yang, X. H., Yin, A. Y., & Jiang, W. (2012). Three-Dimensional Numerical Evaluation of Influence Factors of Mechanical Properties of Asphalt Mixture. Journal of Mechanics, 28(3), 569–578." DOI:10.1017/jmech.2012.65

Dopo una breve introduzione sulla letteratura per la modellazione, l'autore sceglie la soglia di 2.36 mm per la distinzione dei *coarse aggregate*. La procedura di generazione del provino inizia con delle sfere di diametro casuale dentro l'intervallo del passante più grande. Per ogni aggregato viene condotta una verifica di sovrapposizione.

Se tutti gli aggregati non rientrano all'interno del provino, essi vengono riallocati per 200.000 volte, altrimenti si applica un fattore di restringimento a tutti gli aggregati.

Per la compattazione si applica un'oscillazione esasperando le forze repulsive tra gli aggregati grazie al software agli elementi discreti PFC-3D.

Successivamente converte le sfere in ellissoidi e poi in poliedri a 34 facce (Figura 4-26).

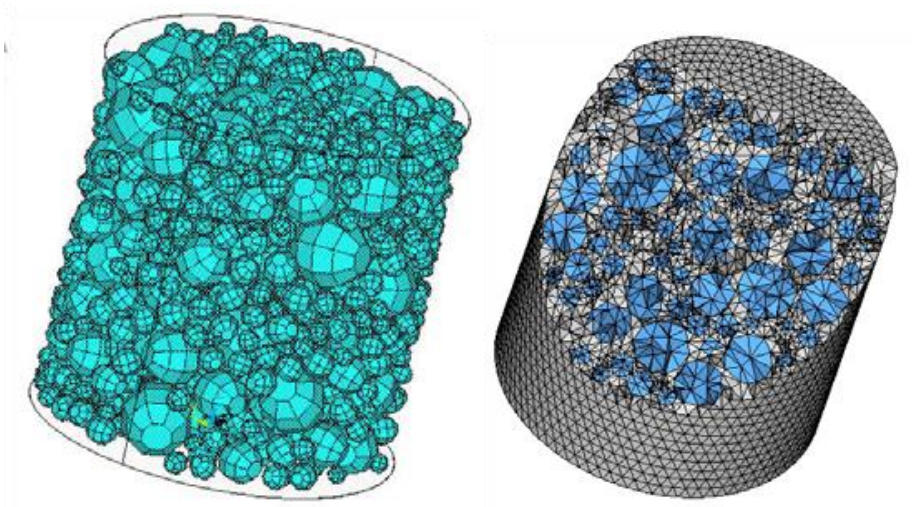


Figura 4-26 Risultato della modellazione numerica con ellissoidi a 34 facce

Questa conversione genera una riduzione di volume degli aggregati che viene compensata generando un fattore moltiplicativo. Per riempire gli spazi intergranulari con la mesh di bitume viene utilizzata una procedura automatizzata del software commerciale Hypermesh.

4.3.5 Considerazioni conclusive

Dopo aver passato in rassegna i suddetti articoli, il piano d'azione ha subìto uno spostamento, facendo migrare lo studio da una prospettiva non soltanto teorica ad una applicativa.

Della letteratura appena esposta, che risulta piuttosto eterogenea per le metodologie d'indagine, si è tentato di fare ordine andando a valutare i profili comuni dei vari studi con una visione critica e propositiva. Si è, dunque, provato a realizzare un quadro completo sullo scenario attuale della ricerca, i cui pezzi sono stati messi al proprio posto ed il puzzle si è andato lentamente costruendo.

Si espongono di seguito alcune considerazioni riassuntive a conclusione della analisi di letteratura.

Modellazione dei vuoti

Pochissimi tra i molteplici studi esaminati tengono conto della presenza dei vuoti all'interno del c.b.. Anche i modelli numerici più recenti e all'avanguardia apparentemente se ne dimenticano per concentrarsi su altri aspetti. Come anticipato, la circostanza non è di poco conto se si considera che proprio la percentuale dei vuoti è un indice di compattazione del materiale e che una sua lieve variazione comporta resistenze meccaniche molto diverse. Allo stato attuale, nella modellazione di un c.b., all'interno della matrice di bitume, che avvolge gli aggregati grossi, vengono considerati indistintamente gli effetti degli aggregati fini, dei vuoti e del bitume stesso in un unico materiale denominato *asphalt mastic*.

Questo può probabilmente inficiare la qualità dei risultati anche in termini di compressibilità della miscela e comportare una sovrastima della resistenza a rottura per trazione del materiale, essendo trascurati i vuoti del sistema che, anche nella loro qualità di potenziali cricche, indeboliscono la matrice di bitume.

Analisi numerica dei conglomerati drenanti

L'importanza di considerare la presenza dei vuoti è conclamata anche in altri ambiti dell'esperienza. A titolo esemplificativo basti pensare al comportamento dei conglomerati drenanti soggetti a

carichi ciclici, in cui, al contrario di quanto fino ad ora emerso circa il fenomeno della compattazione, risultano quasi del tutto assenti gli studi in merito. Per l'appunto, il conglomerato drenante appartiene al gruppo dei conglomerati aperti che ha una percentuale dei vuoti tra il 10% ed il 22%, scelta in funzione dello specifico caso applicativo. Avendo essi un ruolo fondamentale nel determinare la resistenza strutturale complessiva di una sovrastruttura flessibile, si ritiene che una loro modellazione particolareggiata, che tenga però debito conto della presenza dei vuoti, possa essere utile alla valutazione numerica delle loro prestazioni.

Studio del contatto intergranulare

Una notevole discrepanza tra i modelli attuali e la realtà si ha inequivocabilmente dal momento che nei primi, diversamente dai secondi, non è presente alcun contatto intergranulare. Infatti, come è possibile evincere dagli studi passati in rassegna, nella fase di *packing* non viene attualmente preso in esame lo spessore del film di bitume tra gli aggregati grossi. La discrasia può essere spiegata in questi termini: nella realtà, durante la fase di compattazione, si creano molteplici punti di contatto tra gli aggregati adiacenti, nodi di una struttura lapidea che irrigidisce notevolmente la miscela; nella compattazione numerica, invece, non viene posta attenzione alla distanza tra i gli aggregati se non al solo fine di valutarne un'eventuale sovrapposizione durante la loro generazione. A tal proposito, si suppone che la distanza tra due aggregati vicini tra loro ed avvolti dal bitume possa essere anch'essa oggetto di studio al fine di valutare significativamente il fenomeno di ingranamento tra gli inerti e, pertanto, si auspica che un cambio di prospettiva, nel quale ci si concentri maggiormente sullo studio del contatto intergranulare, possa portare a modelli numerici di compattazione degli aggregati più fedeli alla realtà.

Studio della forma degli aggregati

La scelta della forma degli aggregati appare avere un ruolo cruciale nella determinazione della resistenza a fatica di una miscela. Allo stato attuale, molti autori idealizzano gli aggregati con forme geometriche

come sfere [29] o ellissoidi [30] per poi essere successivamente approssimati in poliedri. Altri tentativi sono stati condotti nella discretizzazione degli aggregati direttamente in poliedri convessi con numero di facce limitato [31] [36]. Di fatto, quindi, nessuno genera aggregati di forma qualsiasi, come in realtà essi sono, ma tutti si avvicinano a forme geometriche predeterminate. Pertanto, si ritiene utile studiare nuove tecniche di modellazione finalizzate a fornire rappresentazioni più realistiche degli aggregati con una parametrizzazione statistica di alcuni fattori di forma.

Affinamento delle tecniche di riproduzione numerica del c.b.

Negli attuali algoritmi di compattazione si è notato che lo studio sulla mutua disposizione degli aggregati è concentrato su un unico aspetto: la collocazione entro una regione confinata di spazio, che rispecchia la forma geometrica di un provino, di un prefissato numero di aggregati. In tutti i modelli, quindi, gli aggregati sono collocati casualmente, uno alla volta, all'interno del provino e, solo a posteriori della collocazione, vengono verificati eventuali conflitti in termini di sovrapposizione con altri aggregati. Il processo di collocazione viene così ripetuto iterativamente finché la verifica di sovrapposizione non dia esito negativo. Tale procedimento crea enormi problemi computazionali poiché, via via che lo spazio all'interno del provino si riempie, la probabilità di trovare uno zona libera diminuisce drasticamente aumentando considerevolmente il numero di iterazioni non riuscite. Tale problema viene generalmente limitato con vari artifici geometrici o riducendo il diametro dell'aggregato da allocare oppure ingrandendo la regione di spazio. Visti i numerosi sforzi in letteratura per ovviare al problema, sarebbe auspicabile un cambio di prospettiva che renda efficaci e soprattutto stabili gli algoritmi di packing.

Analisi dei modelli di fessurazione

Il modello di fessurazione coesiva con comportamento elasto-plastico bilineare di tipo softening, è largamente utilizzato nelle pubblicazioni scientifiche quale legame costitutivo del mastice di bitume, sia per la sua semplicità di applicazione che per gli ottimi

risultati forniti. Infatti, tramite l'utilizzo di questo legame è possibile modellare efficacemente i fenomeni di microfessurazione, nucleazione e coalescenza della frattura per la formazione finale di una macrofessurazione. I risultati ottenuti sono stati validati nel solo caso di trazione uniassiale e, pertanto, un punto chiave per la ricerca futura potrebbe riguardare la calibrazione dei parametri del modello anche in simulazioni di altro tipo.

Riassumendo quanto precedentemente esaminato, si evidenzia che, allo stato attuale, esistono alcune limitazioni di carattere tecnico e metodologico, che si traducono in nuovi spunti e idee di ricerca. Come sarà proposto nel capitolo 6, una soluzione alternativa potrebbe essere la definizione di un algoritmo innovativo per la generazione casuale degli aggregati, che abbia al contempo una parametrizzazione statistica di alcuni fattori tali da generare forme degli aggregati più attinenti alla realtà. Dal momento che gli algoritmi classici sono basati esclusivamente su tecniche di mesh di tipo top-down, che portano con sé il deficit di una gestione limitata della mesh, la caratteristica che potrebbe rendere un algoritmo innovativo potrebbe consistere nel cambiamento radicale della prospettiva di modellazione, utilizzando un approccio "bottom-up" nella rappresentazione delle diverse fasi del sistema.

5 Cenni di modellazione ad elementi finiti e topologia della mesh

La disamina degli attuali modelli presenti in letteratura, già esposta nel paragrafo 4.3, ha consentito di formare una conoscenza aggiornata sullo stato dell'arte e un base solida sulla quale poter fondare lo studio della metodologia innovativa di modellazione a mesoscala del conglomerato bituminoso trattata nel capitolo 6.

Prima, però, di inoltrarsi nell'esposizione del modello, per chiarezza espositiva, si ritiene opportuno utilizzare il presente capitolo per esporre alcuni concetti teorici ed applicativi di modellazione numerica ad elementi finiti. Tali concetti sono essenziali per comprendere appieno quanto successivamente riportato nella descrizione del modello dove verrà fatto ampio utilizzo delle nozioni qui presentate. Tale esigenza deriva dal fatto che il modello proposto, abbandonando il tradizionale concetto di modellazione geometrica, opera intensivamente con gli elementi finiti e sfrutta le relazioni e le operazioni topologiche della mesh al fine di realizzare un modello tridimensionale della miscela bituminosa che rappresenti in modo più realistico la struttura fisica e il comportamento meccanico del materiale.

In primis occorre precisare che per operare direttamente con gli elementi finiti, gli stessi devono essere liberi da un qualunque vincolo di dipendenza funzionale, ovvero, prendendo in prestito un termine largamente in uso nei software di modellazione, devo essere "orfani". Una *Orphan mesh* è costituita da nodi ed elementi che, quindi, esistono senza essere associati ad una geometria e possono essere modificati senza alcun vincolo. Esistono diversi modi per ottenere una mesh orfana:

- Definendo direttamente i nodi, tramite le loro coordinate, e gli elementi, tramite la connettività dei nodi.
- Importando un file di input o di output di un qualunque software di analisi ad elementi finiti.
- Creando la mesh da una geometria ed eliminando successivamente l'associazione alla geometria che l'ha generata.

La gran parte degli attuali software di modellazione FEM in commercio consente di importare, esportare, generare e manipolare mesh orfane permettendo anche di effettuare modifiche a nodi ed elementi tramite appositi strumenti e funzioni software. Operare però direttamente sulla mesh, seppur con l'ausilio di diversi tool, comporta delle difficoltà non trascurabili quando si voglia agire controllando alcuni parametri geometrici o eseguendo operazioni ripetitive. A meno di rari casi in cui è conveniente eseguire tali operazioni manualmente, ad esempio quando serve modificare solo qualche elemento della mesh o rifinire la stessa solo in una determinata zona, il più delle volte è necessario fronteggiare la problematica della modellazione predisponendo algoritmi e codici software realizzati ad-hoc. Tale necessità implica uno studio attento della procedura di analisi FEM ed un approfondimento delle nozioni base di modellazione ad elementi finiti che, generalmente, vengo trascurati perché superflui in un uso convenzionale dei software di simulazione. Questo ulteriore sforzo si rende necessario per poter determinare le proprietà geometriche del modello che in questa circostanza possono essere ricavate unicamente dagli elementi finiti di cui è composto. Qui di seguito si riportano le informazioni sulla topologia della mesh usate come base del presente studio e le modalità operative di calcolo delle proprietà geometriche degli elementi finiti, sia singolarmente che in gruppo. Inoltre verrà fornito qualche breve cenno su come determinare alcuni parametri topologici della mesh indispensabili per il funzionamento degli algoritmi presentati nel capitolo 6.

5.1 Entità topologiche primarie

Per poter applicare il metodo a elementi finiti è necessario frammentare il dominio di calcolo. Si passa, quindi, da un modello continuo ad un modello discretizzato. Questa discretizzazione consente di scomporre un problema complesso in tanti problemi semplici. La soluzione dell'insieme di tutti i problemi semplici (di cui ogni singola soluzione è nota) porta alla soluzione del problema generale. In altre parole, si passa da un numero di gradi di libertà infinito, il continuo, ad un numero di gradi di libertà finito, il discreto.

La mesh, ovvero la discretizzazione del dominio di calcolo, è composta da geometrie primitive (elementi finiti) di forma matematicamente definita. Ad esempio, per un domino a tre dimensioni, vengono utilizzati generalmente tetraedri, esaedri e cunei oppure, in casi meno frequenti, oggetti poliedrici. A tal fine si riporta in Figura 5-1, l'insieme di elementi finiti utilizzati nel software Abaqus, includendo anche l'ordinamento dei nodi e delle facce sugli elementi.

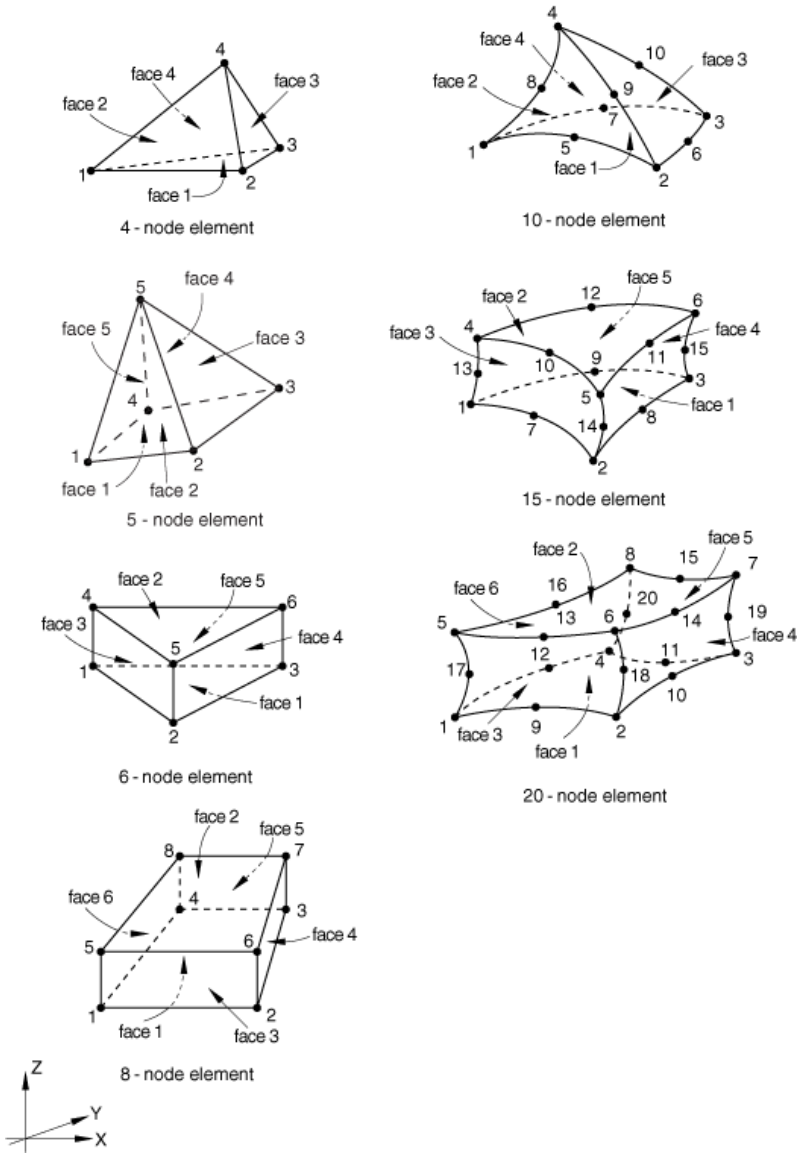


Figura 5-1 Elementi tridimensionali utilizzati in Abaqus [37]

Le parti da cui è composto un elemento finito sono definite entità topologiche primarie e sono:

- **vertici**: che definiscono ciascun spigolo V;
- **spigoli**: che delimitano ciascuna faccia E;
- **facce**: che delimitano un Elemento Finito.

Da una combinazione ordinata di più entità topologiche primarie si possono ottenere entità topologiche composte come: Loop – Shell – Solido.

5.2 Proprietà degli elementi finiti

I singoli elementi finiti di forma tetraedrica hanno delle proprietà intrinseche che sono facilmente calcolabili. Di seguito si rappresentano le modalità di calcolo di alcune di queste proprietà anche relativamente alle facce dei tetraedri.

Superficie

Noto che il modulo del prodotto vettoriale tra due vettori è l'area del parallelogramma individuato dai vettori stessi, l'area di un triangolo nello spazio può essere calcolata come segue. Dati tre punti nello spazio $A = (x_A, y_A, z_A)$, $B = (x_B, y_B, z_B)$ e $C = (x_C, y_C, z_C)$ non allineati, l'area del triangolo da essi individuato é:

$$A_{ABC} = \frac{1}{2}\left\|\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}\right\| \tag{5-1}$$

Volume

Il volume del tetraedro è dato da un terzo del prodotto dell'area di una delle sue facce per l'altezza ad essa relativa secondo la formula:

$$V = \frac{1}{3}A_0 h \tag{5-2}$$

Noto che si chiama prodotto scalare tra due vettori il numero che si ottiene moltiplicando il modulo del primo per l'intensità del vettore componente del secondo lungo il primo, l'altezza del tetraedro rispetto ad una base si ottiene dal prodotto scalare tra un vettore rappresentante uno spigolo non appartenente alla base considerata e la normale alla base stessa. Pertanto, considerando che il prodotto

vettoriale di due vettore è anch'esso un vettore avente direzione normale ad entrambi i vettori e che l'area di un triangolo può essere calcolata secondo la (5-1), il volume di un tetraedro avente vertici $A = (x_A, y_A, z_A)$, $B = (x_B, y_B, z_B)$, $C = (x_C, y_C, z_C)$ e $D = (x_D, y_D, z_D)$ è dato da:

$$V_{ABCD} = \frac{1}{6}\left\|\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC} \cdot \overrightarrow{AD}\right\| \quad (5\text{-}3)$$

<u>*Baricentro*</u>

È noto che ogni coordinata del baricentro di un triangolo è ottenibile dalla media delle rispettive coordinate dei vertici del triangolo, ovvero in formule:

$$x_{G_{ABC}} = \frac{x_A + x_B + x_C}{3} \quad (5\text{-}4)$$

Analoga considerazione vale per le coordinate y e z.

Siano $A = (x_A, y_A, z_A)$, $B = (x_B, y_B, z_B)$, $C = (x_C, y_C, z_C)$ e $D = (x_D, y_D, z_D)$ i vertici di un tetraedro e sia $G = (x_G, y_G, z_G)$ il baricentro del tetraedro stesso. Dato che il baricentro G di un tetraedro divide la mediana in un rapporto 1:3. La coordinata x del baricentro è[38]:

$$x_G = \frac{3\left(\frac{x_A + x_B + x_C}{3}\right) + 1(x_D)}{3+1} = \frac{x_A + x_B + x_C + x_D}{4} \quad (5\text{-}5)$$

L'espressione è analoga per le coordinate y e z.

<u>*Angolo solido*</u>

In geometria un angolo solido è un'estensione allo spazio tridimensionale del concetto di angolo piano.

L'angolo solido è utilizzato di norma per determinare le caratteristiche superficiali di una mesh come depressioni, picchi o porzioni piane come rappresentato in Figura 5-2.

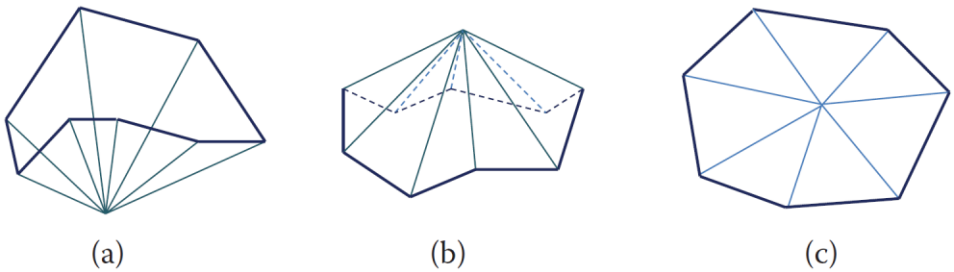


Figura 5-2 Angoli solidi di una superficie: (a) depressione $\Omega > 2\pi$; (b) picco $\Omega < 2\pi$; (c) superficie piatta $\Omega > 2\pi$. [39]

La misura in steradianti dell'angolo solido Ω è definita come A/R^2, dove A è l'area della porzione di superficie sferica di raggio R vista sotto l'angolo Ω. Tale definizione è indipendente dal particolare valore del raggio scelto, ed è un'estensione allo spazio tridimensionale della definizione della misura di un angolo piano ϑ in radianti come s/r, dove s è la lunghezza dell'arco di cerchio di raggio r sotteso da ϑ. L'angolo solido sotteso da una superficie generica rispetto a un punto P è dunque equivalente a quello sotteso dalla proiezione della stessa superficie su una sfera di raggio qualsiasi centrata in P.

Una semplice formula per calcolare la misura dell'angolo solido sotteso di un triangolo di vertici $\mathbf{R}_1$, $\mathbf{R}_2$, $\mathbf{R}_3$ e visto dall'origine è stata formulata da Oosterom e Strackee [40]:

$$\frac{|\mathbf{R}_1\cdot(\mathbf{R}_2\times\mathbf{R}_3)|}{R_1R_2R_3+(\mathbf{R}_1\cdot\mathbf{R}_2)R_3+(\mathbf{R}_1\cdot\mathbf{R}_3)R_2+(\mathbf{R}_2\cdot\mathbf{R}_3)R_1} \tag{5-6}$$

dove:

$\mathbf{R}_i$: è la rappresentazione vettoriale del punto i;

R_i: è la distanza del punto i dall'origine (norma euclidea di $\mathbf{R}_i$);

$\mathbf{R}_i\,\mathbf{R}_j$: denota il prodotto scalare;

$\mathbf{R}_i \times \mathbf{R}_j$: denota il prodotto vettoriale;

$|\cdot|$ denota il valore assoluto.

5.3 Proprietà di gruppi di elementi

Le definizioni delle proprietà degli elementi finiti, descritte nel par. 5.2, sono mutuabili anche per insiemi di elementi finiti son

<u>*Diametro medio*</u>

Dato un gruppo di elementi finiti che, nel loro insieme, hanno una forma pressappoco sferica, si può definire i diametro medio dell'insieme come il diametro della sfera di pari volume agli elementi considerati. In formule:

$$d_{med} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}\sum_{i=1}^{N} V_i} \tag{5-7}$$

Dove V_i è il volume dell'elemento i-esimo degli N elementi appartenenti all'insieme.

Sfericità

Un parametro per la caratterizzazione geometrica di un oggetto tridimensionale è la sfericità che indica quanto una generica forma sia lontana da quella sferica. La sfericità è definita come il rapporto tra la superficie esterna di una particella con qualsivoglia geometria e la superficie esterna della sfera equivalente (cioè della sfera con lo stesso volume della particella). Tra tutte le possibili figure tridimensionali, quella col più piccolo rapporto superficie/volume è la sfera. Molti oggetti fisici tendono a tale forma: le bolle sono sferiche perché tendono a minimizzare la tensione superficiale minimizzando l'area a parità di volume; le cellule in natura di forma pressoché sferica hanno dimensioni non troppo grandi perché tendono a minimizzare il rapporto V/S per favorire gli scambi con l'esterno. Con l'aumentare del raggio, dunque, il volume della sfera cresce più della superficie. Infatti il rapporto fra queste due quantità è R/3. Al contrario del rapporto S/V la sfericità è un parametro adimensionale perché è un rapporto tra due superfici. Al fine di caratterizzare dimensionalmente le particelle solide la sfericità è impiegata, in vari campi dell'ingegneria. In particolare, per quanto spiegato sopra, questo parametro sarà sempre maggiore di uno e tenderà ad uno quanto più la particella si avvicini alla forma sferica.

Asperità della superficie

Una misura diretta dell'asperità di una superficie può essere ricavata dagli angoloidi relativi ai vertici della superficie stessa. Fruttando la definizione di angolo solido, già esposta al par. 5.2, un angoloide di un vertice di una porzione di mesh tetraedrica può essere misurato come somma di tutti gli angoli solidi dei tetraedri afferenti a quel vertice. Ovviamente, più una superficie è liscia più l'angoloide misurato rispetto ad un punto di quella superficie tende a 2π, ossia il valore relativo ad una superficie piana, ma, è necessario verificare che anche i vertici nelle immediate vicinanze abbiano valori simili. In funzione dell'oggetto da rappresentare e della suddivisione utilizzata, considerare una valore di 2π quale parametro di riferimento può essere fuorviante. Infatti, se si prende in esame una sfera discretizzata con elementi triangolari (Figura 5-3), il valore dell'angoloide sotteso

ad ogni vertice dipenderà dal numero di elementi con i quali la sfera è stata discretizzata.

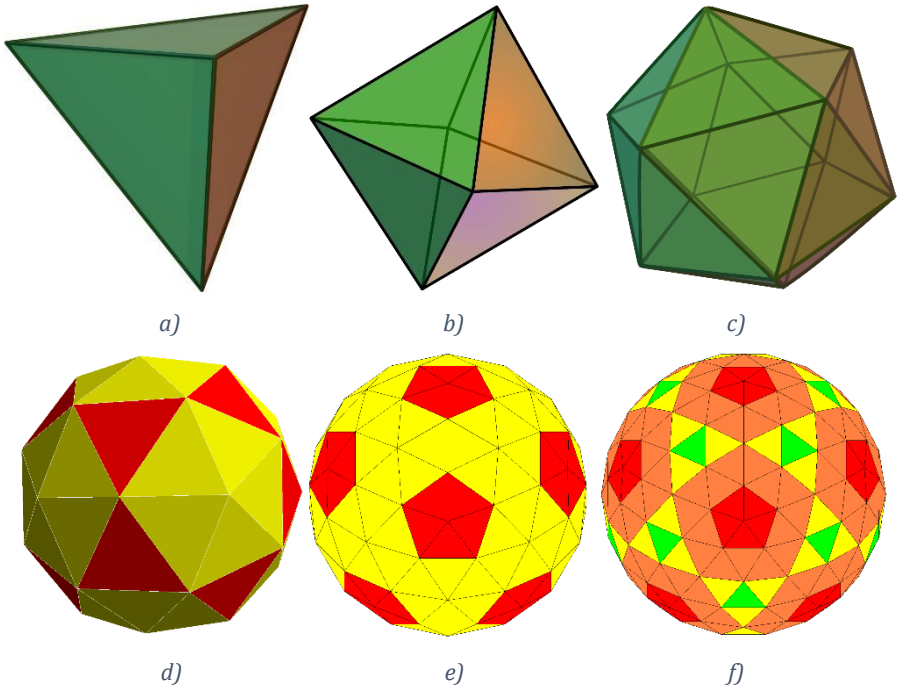


Figura 5-3 - a) tetraedro; b) ottaedro; c) icosaedro; d) poliedro geodetico (2,0); e) poliedro geodetico (3,0); f) poliedro geodetico (4,0);[4]

L'irregolarità di una superficie, pertanto, può essere misurata come variazione dell'angoloide tra punti limitrofi della stessa superficie.

5.4 Operazioni topologiche di una mesh tetraedrica

Per poter eseguire operazioni topologiche tra elementi finiti è necessario, in via preliminare, definire compiutamente gli elementi considerati. In particolare è necessario stabilire l'ordine di numerazione dei nodi e l'orientamento delle facce in funzione dell'elemento considerato.

[4] https://it.wikipedia.org/wiki/Solido_platonico; https://en.wikipedia.org/wiki/Geodesic_polyhedron

Nel presente lavoro di tesi ci si è soffermati sugli elementi tetraedrici a quattro o dieci nodi così come proposti dal software commerciale Abaqus e riportato in Figura 5-4.

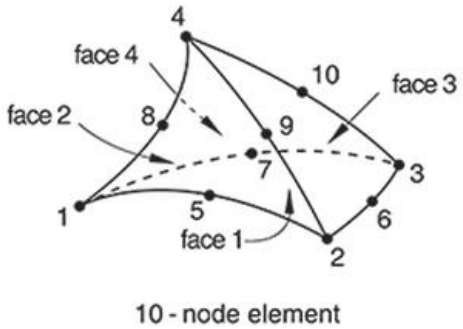


Figura 5-4 Elemento C3D10 (10-node quadratic tetrahedron) [37]

Non essendo vincolati a priori all'utilizzo una numerazione univoca dei vertici dell'elemento si è assunta come base la numerazione proposta di Abaqus.

Qui di seguito si riportano alcuni dei principali algoritmi utili per la definizione di relazioni tra elementi finiti.

5.4.1 Determinazione delle facce di una mesh tetraedrica

L'algoritmo è basato sull'idea che una faccia è condivisa da due elementi in modo tale che l'orientamento della faccia in funzione del tetraedro considerato sia opposto al tetraedro adiacente e viceversa, come mostrato in Figura 5-6. Si può prendere in considerazione l'ordinamento dei nodi [1 2 3;1 4 2;2 4 3;3 4 1] che definisce le facce di un tetraedro con normale entrante nello stesso secondo la regola della mano destra, come rappresentato in Figura 5-5.

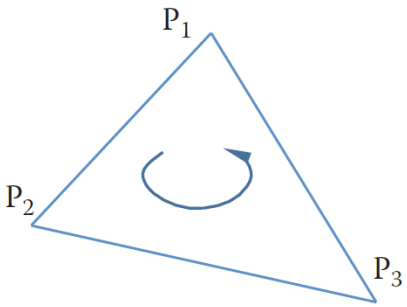


Figura 5-5 Orientamento di una faccia[39]

Un possibile modo di procedere si ha ricercando il massimo e il minimo nodo di una faccia triangolare e considerando l'orientamento della faccia solo in un unico verso ovvero l'ordinamento dei nodi solo crescente o viceversa, in modo tale da includere una sola volta la faccia considerata. In tal caso restano non determinabili con questo criterio le facce presenti sul contorno e, pertanto, è necessario includere un nell'algoritmo l'informazione relativa alle facce appartenenti al contorno così considerarle a priori bypassando la verifica di ordinamento dei nodi. Per una più dettagliata definizione dell'algoritmo si rimanda al riferimento bibliografico [39].

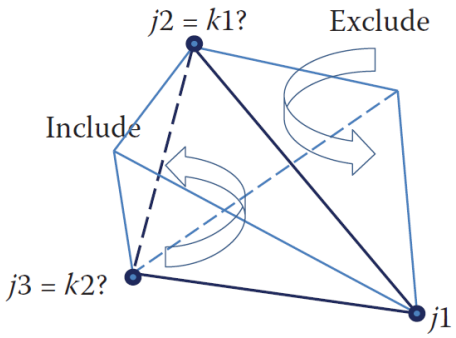


Figura 5-6 - Determinazione delle facce di una mesh tetraedrica[39]

5.4.2 Determinazione dei tetraedri connessi ad una faccia

Nella manipolazione di una mesh è quasi sempre necessario conoscere le relazioni tra elementi finiti che si trovano da un lato o dall'altro di una superfice. Una circostanza abbastanza comune per la quale è indispensabile determinare tale informazione è la formulazione delle superfici di contatto e, quindi, l'assegnazione di una particolare topologia della mesh nelle zone in cui alcuni elementi non condividono delle facce ma sono tra loro vicini e si scambiano forze di mutua repulsione in funzione della posizione relativa dei nodi. Per fare ciò partendo da una mesh orfana, occorre innanzitutto conoscere la superficie di interazione espressa come una serie di facce triangolari interconnesse. Nota la singola faccia, l'obiettivo dell'algoritmo consiste nel determinare l'identificativo dei due elementi finiti che la stessa faccia congiunge. Stabilendo un identificativo univoco delle facce della mesh, come riportato al par. 5.4.1, si può ottenere una matrice F_T contenente gli identificativi delle facce che sono connesse ai tetraedri,

in modo tale che l'elemento $F_T\{i,j\}$ della matrice sia l'id della j-esima faccia del i-esimo tetraedro. Nota questa matrice è possibile condurre un'operazione di inversione della stessa in modo tale da ottenere una nuova matrice T_F che consente di conoscere quali tetraedri sono connessi ad una determinata faccia. Questa informazione è registrata in una matrice di n_f righe pari al numero di facce presenti nella mesh e due colonne, pari al numero massimo di elementi finiti che può condividere una faccia. Per popolare tale matrice è sufficiente iterare quattro volte la matrice F_T, una per ogni colonna della stessa, inserendo il valore corrente dell'iterazione i-esima alla riga $F_T\{i,j\}$ e alla prima o seconda colonna a seconda del caso che la prima contenga già un dato o meno.

5.4.3 Determinazione degli elementi adiacenti

Il concetto dell'algoritmo si basa sul fatto che due elementi sono vicini se condividono una faccia in comune e che una faccia triangolare è unicamente definita dai tre nodi della faccia. L'obiettivo, quindi, è determinare l'id dell'elemento finito adiacente alla faccia j-esima dell'elemento i-esimo. Questo può avvenire tramite un utilizzo combinato delle matrici T_F e F_T, già menzionate al par. 5.4.2. In particolare, noto l'elemento i-j della matrice F_T (l'id della faccia j-esima del tetraedro i-esimo), si estrae la riga contenuta nella matrice T_F corrispondente a detta faccia, la quale rappresenta un vettore di due elementi riportanti l'id dei tetraedri adiacenti alla faccia stessa. Ovviamente, uno dei due elementi coinciderà con l'id del tetraedro i-esimo e l'altro elemento, a questo punto facilmente identificabile, sarà proprio l'id del tetraedro adiacente alla faccia j del tetraedro i-esimo. La matrice degli elementi adiacenti T_T può essere pertanto popolata ripetendo il suddetto procedimento quattro volte (tante quanto sono le facce di un tetraedro) e per ogni tetraedro presente nella mesh. E' necessario esaminare la circostanza in cui un tetraedro si trovi sul contorno. In tal caso, se la faccia j-esima del tetraedro i-esimo appartiene al contorno, l'elemento $F_T\{i,j\}$ avrà valore nullo e si dovrà porre una particolare condizione annullando anche il corrispondente elemento nella matrice T_T.

5.4.4 Determinazione del contorno di una mesh

Per i problemi in cui il contorno di una mesh è soggetto a vincoli o carichi è necessario poter individuare numericamente le facce che si trovano sul contorno stesso. I confini di una mesh tetraedrica possono essere determinate unicamente da considerazioni topologiche. Per definizione, una faccia appartenente al contorno è una faccia triangolare di un elemento che non è condivisa con nessun altro elemento. Conoscendo le vicinanze di un elemento non è difficile ricavare tutte quelle facce che sono connesse solo con un singolo elemento come mostrato in Figura 5-7.

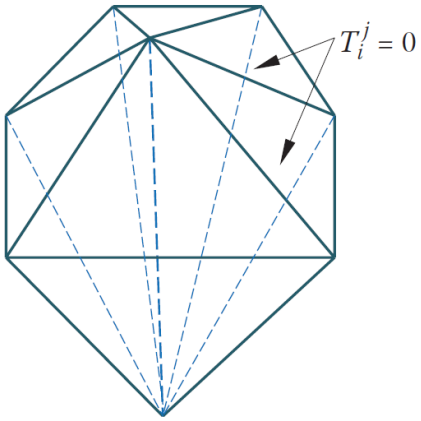


Figura 5-7 - Facce sul contorno[39]

5.4.5 Determinazione degli elementi connessi ad un nodo

La prima parte dell'algoritmo è quella di stabilire l'array di puntatori P in cui P_k memorizza il numero di nodi maggiore di e connesso a un nodo particolare k. Impostando $P_1 = 1$, il conteggio cumulativo delle connessioni nodali si ottiene aggiungendo $P_k + P_k$-1 a P_k in modo tale che i nodi connessi ad esso e maggiori di k siano compresi nell'intervallo da P_{k-1} a P_k - 1 incluso. Nel trovare gli elementi collegati a ciascun nodo in una mesh, nella prima parte dell'algoritmo, il numero di elementi collegati a ciascun nodo è determinato e memorizzato nell'array P.

Nella seconda parte, lo stesso procedimento viene nuovamente ripetuto, ma questa volta, conoscendo il numero di elementi collegati al nodo k, l'elemento reale i è memorizzato nello spazio allocato al

nodo k in P. Si noti che è stato utilizzato un solo array lineare P per marcare il punto iniziale e il punto finale degli elementi collegati a ciascun nodo k, i quali sono anche memorizzati all'interno di P in base alle posizioni dei punti iniziale e finale. Di seguito si presenta l'algoritmo per trovare tutti gli elementi collegati a ciascun nodo in una mesh tetraedrica. Come mostrato nella Figura 5-8, l'elemento i contenente il nodo k (cioè $k = V_i^j$ per j = 1,2,3,4) saranno registrati nell'array P.

// Find the elements connected to each node in a tetrahedral mesh
// Np and Ne are respectively the number of nodes and elements in the mesh.
// Input: V = Vertices of the elements
// Output: Elements connected to node k: {Pi, i = Pk + 1, Pk+1}
Set zero to array P: $\{P_k = 0, k = 1,N_p + 1\}$
  Loop: $i = 1,N_e$
    Loop: $j = 1,4$
    $k= V_i^j; P_k = P_k + 1$
    End loop j
  End loop i
  $P_1 = P_1 + N_p + 1$
  Loop: $k = 1,N_p$
  $P_{k+1} = P_{k+1} + P_k$
  End loop k
  Loop: $i = 1,Ne$
    Loop: $j = 1,4$
    $k= V_i^j; m = P_k; P_m = i; P_k = m - 1$
    End loop j
  End loop i

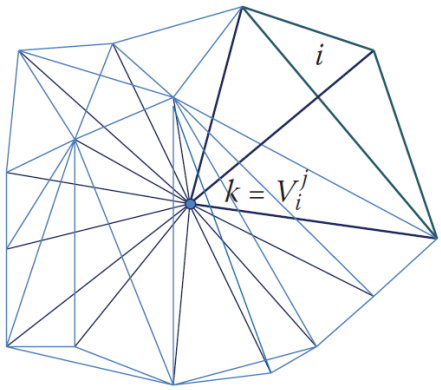
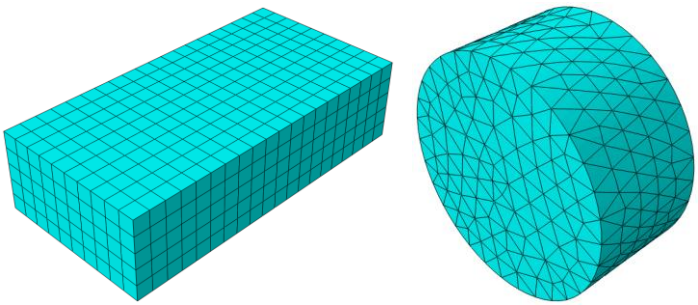


Figura 5-8 - Elementi tetraedrici attorno ad un generico nodo k[39]

5.5 Procedure preliminari di calcolo sulla mesh

Manovrare elementi finiti o gruppi di essi in modo diretto è alquanto complesso, a maggior ragione se le scelte a monte di tali operazioni non sono condotte manualmente ma, bensì, tramite un algoritmo. In un modello fem la mesh viene creata e gestita automaticamente e, generalmente, alcune modifiche manuali sono condotte solo per migliorare la qualità stessa della mesh. In questa sede, volendo operare direttamente sugli elementi della una mesh, è indispensabile condurre una serie di operazioni propedeutiche al fine di poter impiegare efficacemente alcuni algoritmi automatizzati di assegnazione di elementi finiti. Come si vedrà nel seguito, tali procedure hanno come scopo la creazione di una struttura di dati snella da porre alla base dei suddetti algoritmi.

Se si considera un dominio a forma di prisma retto a base rettangolare, come rappresentato in Figura 5-9a, composto da esaedri regolari disposti in sequenza nelle tre direzioni, allora la posizione di ognuno di questi elementi può essere univocamente identificata da una terna di parametri i,j,k che variano da uno al numero massimo di elementi nella rispettiva direzione. In un modello così ordinato, è piuttosto semplice individuare quali siano gli elementi adiacenti all'elemento i,j,k poiché basta aumentare e diminuire ognuno dei parametri di una unità per trovare le sei terne di parametri che definiscono gli elementi a contatto con l'elemento stesso.



a) *b)*

Figura 5-9 - Confronto tra mesh con struttura ordinata (a) e disordinata (b)

Nel caso in cui ci si trovi di fronte ad un dominio cilindrico con elementi tetraedrici, come quello rappresentato in Figura 5-9b, la situazione si complica particolarmente poiché non esiste una struttura

ordinata di elementi sulla quale potersi orientare e, quindi, per poter determinare quali siano i quattro elementi adiacenti ad un generico elemento tetraedrico si deve necessariamente ricorrere ad operazioni topologiche o geometriche che consentano di individuare tra tutti gli elementi finiti quelli che abbiano una tripletta di nodi in comune con l'elemento di riferimento.

Una mesh costituita da un insieme di elementi finiti (anche di diversa forma) connessi tra loro può essere compiutamente definita da due insiemi di dati:

- una lista dei nodi che contiene le informazioni sulle coordinate di ogni nodo;
- una lista degli elementi che riporta la numerazione dei nodi che l'elemento stesso connette e, nel caso in cui fossero presenti elementi di diversa forma, anche la tipologia dell'elemento.

Queste sono le informazioni *topologiche* della mesh, essenziali per poter condurre un'analisi a elementi finiti. Nel caso di specie, volendo intervenire preventivamente sulla mesh e sull'attribuzione delle proprietà meccaniche ai singoli elementi finiti, gli algoritmi adatti allo scopo potrebbero essere progettati per calcolare di volta in volta le informazioni necessarie (ad es. l'adiacenza tra elementi o il volume di un gruppo di elementi) partendo dalle coordinate dei nodi e dalla connettività degli elementi, ma ciò comporterebbe un appesantimento del codice ed un aumento eccessivo dei tempi di calcolo.

Si rende, pertanto, più opportuno costruire una struttura di dati, frutto di una pre-elaborazione sulla mesh, con lo scopo di facilitare e snellire gli algoritmi atti ad espletare la predetta attribuzione. Più precisamente, le informazioni aggiuntive sulla mesh riguardano non solo la topologia della mesh stessa ma anche la sua geometria e, di seguito, se ne riporta una breve descrizione, anche relativamente al loro calcolo.

Innanzitutto, è bene precisare che avendo sviluppato la gran parte degli algoritmi in ambiente Matlab si riporteranno, di seguito, alcuni estratti del codice sfruttandone le funzioni e rispettandone la sintassi.

Come già preannunciato, le informazioni di partenza sono le due seguenti tabelle di dati:

$$p = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_N & y_N & z_N \end{bmatrix} \quad t = \begin{bmatrix} n_{1,1} & n_{1,2} & n_{1,3} & n_{1,4} \\ n_{2,1} & n_{2,2} & n_{2,3} & n_{2,4} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_{T,1} & n_{T,2} & n_{T,3} & n_{T,4} \end{bmatrix}$$

Dove:

- x_i rappresenta la coordinata lungo l'asse x dell'i-esimo nodo e così via per le altre direzioni;
- $n_{i,j}$ rappresenta il nodo corrispondente al j-esimo vertice del i-esimo elemento;
- N rappresenta il numero totale di nodi;
- T rappresenta il numero totale di tetraedri.

Per comodità, è utile generare anche due vettori p_label e t_label che rappresentano due liste di elementi identificativi rispettivamente per i nodi e per gli elementi finiti. Di seguito se ne riportano le formulazioni:

p_label=[1:size(p,1)]'
t_label=[1:size(t,1)]'

Nel caso specifico è stato sono stati impiegati elementi tetraedrici a quattro nodi, utilizzando la stessa convenzione per la nomenclatura delle facce e dei nodi proposta in Abaqus, riportata in Figura 5-10.

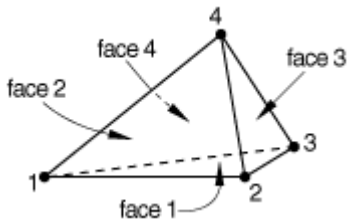


Figura 5-10 - Convenzioni elemento C3D4 Abaqus

Identificata la convenzione da utilizzare per il tetraedro, è conveniente definire, per gli usi futuri, anche le relazioni tra le facce e i nodi dello stesso ed, in particolare, i seguenti vettori:

- Vertici appartenenti alla faccia:

  face_nodes = [1 2 3;1 4 2;2 4 3;3 4 1]

- Vertice opposto alla faccia:

  face_opposite_node = [4;3;1;2]

- Faccia opposta al vertice:

  node_opposite_face = [3;4;2;1]

In seguito si crea una lista *ftot* contenente un successione di triplette di nodi appartenenti alla prima faccia ogni elemento e, così in cascata anche per le altre tre facce, in modo tale da avere una matrice di tre colonne (quanti sono i vertici di una faccia) e 4T righe (pari al numero totale di facce di tutti i tetraetri). Si riporta di seguito la procedura di calcolo di *ftot*:

```
ftot=[]
for i=1:4
        ftot=[ftot;t(:,face_nodes(i,:))]
end
```

Ovviamente, in funzione dalla conformazione della mesh, alcuni tetraedri avranno dei nodi in comune con altri, così nella matrice *ftot* ci saranno alcune righe che contengono gli stessi elementi. In particolare, se si considerano due tetraedri adiacenti, una per ognuno dei due tetraedri vi sarà una faccia che condividerà con l'altra tutti e tre i nodi e, quindi, nella matrice *ftot* si avrà una coppia di righe che, seppur con un ordine diverso, conterrà gli stessi elementi. Per rilevare questa adiacenza è pertanto necessario identificare univocamente le facce degli elementi finiti a prescindere dal loro orientamento o dall'ordine di numerazione dei nodi. Per fare ciò, è possibile ordinare preventivamente gli elementi in ogni riga di *ftot*, tramite di seguente comando:

```
ftot=sort(ftot,2)
```

Le facce del modello possono così essere identificate univocamente tramite la seguente funzione:

```
[f,ia,ic]=unique(ftot,'rows')
```

Tale comando, oltre a restituire una matrice *f* nella quale non sono presenti le ripetizioni di righe in *ftot*, fornisce anche un vettore *ic* tale da soddisfare l'equazione *fot = f(ic)*. Come già fatto per i nodi e per gli elementi finiti, è utile generare anche un vettore identificativo delle facce:

```
f_label=[1:size(f,1)]'
```

A questo punto si potranno distinguere due possibili casi: una riga in *ftot* è ripetuta una ed una sola volta (poiché una faccia può essere in comune a non più di due tetraedri); una riga in *ftot* senza alcuna

ripetizione (poiché appartenente ad un solo tetraedro). Tramite questa differenziazione diventa facile individuare anche quale sia il confine del modello poiché apparterranno ad esso tutte le facce (*f_boundary*) che compaio una ed una sola volta in *ftot*; per converso, le facce interne al modello (*f_inner*) corrisponderanno a quelle che compaiono due volte nella stessa matrice. Quanto esposto può essere così tradotto in codice:

```
f_location=accumarray(ic,1)
f_boundary=f_label(f_location==1)
f_inner=f_label(f_location==2)
```

Come già anticipato, lo scopo della presente procedura è quello di creare una struttura di dati che metta in relazione i vari elementi topologici della mesh. Un primo componente di questa struttura è una tabella che crei un'associazione tra l'identificativo, d'ora in poi "id", di un tetraedro e l'id delle rispettive facce ad esso appartenenti. Fruttando le proprietà di *ic* la suddetta tabella può essere ottenuta come segue:

```
t_f=reshape(ic,[numel(t_label),4])
```

Per converso, è utile creare anche un'associazione inversa rispetto alla precedente, tra l'id della faccia e l'id dei tetraedri ad esso confinanti.

```
t_fid=repmat(1:size(t,2),size(t,1),1)
[ f_t,f_ftid ] = invertreference( t_f ,t_fid)
```

Per fare ciò è stata utilizzata la funzione *invertreference* progettata ad hoc e riportata per completezza in Appendice A. Contemporaneamente, sfruttando le proprietà della stessa funzione, è stata ottenuta la matrice *f_ftid* che ad ogni faccia associa un'ulteriore informazione in merito ai due tetraedri adiacenti (ove esistano entrambi, o in alternativa solo ad uno): un numero da uno a quattro che individua quale sia la faccia del tetraedro adiacente rispetto al tetraedro stesso e non ad un identificativo assoluto.

E' anche comodo conoscere l'associazione tra l'id di un tetraedro e quello dei tetraedri adiacenti, ottenibile come segue:

```
t_t=zeros(size(t_f))
for i=1:4
   t_ttemp=f_t(t_f(:,i),:)
```

```
   t_ttemp(t_ttemp==[t_label t_label])=0
   t_t(:,i)=sum(t_ttemp,2)
end
```

Riprendendo le definizioni e le modalità di calcolo presentate al par. 5.2, di seguito si riportano sinteticamente le operazioni condotte per determinare alcune proprietà geometriche degli elementi finiti:

<u>*Area delle facce*</u>

```
f_a=0.5*sum(cross(p(f(:,2),:)-p(f(:,1),:),p(f(:,3),:)-p(f(:,1),:),2).^2,2).^0.5
```

<u>*Volume dei tetraedri*</u>

```
t_vol=1/6*dot(cross(p(t(:,2),:)-p(t(:,1),:),p(t(:,3),:)-p(t(:,1),:)),p(t(:,4),:)-
p(t(:,1),:),2)
```

<u>*Baricentro dei tetraedri*</u>

```
t_centroid=[(p(t(:,1),1)+p(t(:,2),1)+p(t(:,3),1)+p(t(:,4),1))/4 ...
        (p(t(:,1),2)+p(t(:,2),2)+p(t(:,3),2)+p(t(:,4),2))/4 ...
        (p(t(:,1),3)+p(t(:,2),3)+p(t(:,3),3)+p(t(:,4),3))/4]
```

<u>*Angoli solidi dei tetraedri*</u>

```
t_p_omega=zeros(size(t,1),4)
for i=1:4
   nodes=t(:,face_nodes(node_opposite_face(i),:))
   a=p(nodes(:,1),:)-p(t(:,i),:)
   b=p(nodes(:,2),:)-p(t(:,i),:)
   c=p(nodes(:,3),:)-p(t(:,i),:)
   ma=(a(:,1).^2+a(:,2).^2+a(:,3).^2).^0.5
   mb=(b(:,1).^2+b(:,2).^2+b(:,3).^2).^0.5
   mc=(c(:,1).^2+c(:,2).^2+c(:,3).^2).^0.5
t_p_omega(:,i)=2*atan(abs(dot(a,cross(b,c),2))./((ma.*mb.*mc)+dot(a,b,2).*m
c+dot(a,c,2).*mb+dot(b,c,2).*ma))
end
```

Un'ultima informazione utile ai futuri calcoli è la matrice "inversa" di *t*, ovvero l'associazione tra un nodo e i tetraedri che afferiscono ad esso, ottenibile come segue:

```
[ p_t,p_t_omega,t_pospt ] = invertreference( t(:,1:4),t_p_omega)
p_num_t=sum(p_t>0,2)
```

Come si può notare, è stata utilizzata la funzione *invertreference*, già discussa in precedenza, e sono state ricavate anche le matrici *p_t_omega* e *t_pospt* che sono rispettivamente gli angoli solidi

riordinati per nodo, riferiti ai tetraedri ad esso afferenti, e la collocazione del tetraedro all'interno della matrice *p_t*.

Si noti inoltre che, essendo i nodi circondati da un numero non sempre uguale di elementi finiti, le matrici *p_t* e *p_t_omega* avranno un numero di colonne pari al numero massimo di elementi finiti che circondano un generico nodo della mesh in esame; pertanto, molti termini delle suddette matrici, quelli delle ultime colonne, saranno pari a zero perché elementi non utilizzati delle stesse.

Infine, il vettore *p_num_t* indica il numero totale di tetraedri afferenti ad un generico nodo.

5.6 Modellazione della frattura

5.6.1 Extended Finite Element Method (X-FEM)

La modellazione discontinuità, come le fratture, con le tecniche tradizionali di modellazione ad elementi finiti richiede che la mesh utilizzata sia coerente con la discontinuità da rappresentare. Nello studio della meccanica della frattura, soprattutto quando viene esaminata la propagazione della frattura all'interno di un materiale, la creazione di una mesh a priori senza che sia noto il reale percorso di frattura è un'operazione ardua se non impossibile. Una soluzione a tale inconveniente consiste nell'aggiornare la mesh continuamente durante una simulazione facendo sì che la stessa segua la geometria della discontinuità durante l'evoluzione della frattura. Tale operazione, tuttavia, risulta di difficilmente attuabile sia per gli oneri computazionali richiesti sia perché la soluzione è in ogni caso influenzata, seppur lievemente, dalle modalità con cui la mesh viene modificata. Per questo motivo, alla fine dello scorso secolo, è stata ideata una tecnica per lo studio della propagazione di discontinuità di diverso tipo, al quale venne dato il nome di XFEM (eXtended Finite Element Method). Questo nuovo metodo di modellazione, introdotto per la prima volta da Belytschko et al. [41], è un'estensione del metodo convenzionale di modellazione ad elementi finiti basato sul concetto di partizione dell'unità di Melenk e Babuska [42], nel quale le equazioni differenziali per la risoluzione spaziale con elementi finiti sono

arricchite attraverso l'utilizzo di funzioni discontinue. In particolare, le funzioni di forma degli elementi finiti che si trovano in prossimità dell'apice della frattura arricchite con l'inserimento di funzioni asintotiche, le quali permettono di descrivere la singolarità del campo di tensioni attorno all'apice, e delle funzioni gradino per descrivere la discontinuità nello spostamento tra le superfici di frattura.

5.6.2 Cohesive Zone Model (CZM)

La modellazione con elementi coesivi consiste nell'interporre tra le superfici (dette anche superfici coesive) degli elementi finiti caratterizzati da un legame costituito in termini di tensione-spostamento. La zona coesiva che si realizza tra le superfici non rappresenta un materiale reale, ma descrive le forze di contatto che si generano tra le superfici quando queste sono soggette ad uno stato di tensione che tende a separarle. Se si sottopone ad elevati sforzi di trazione un materiale eterogeneo contenente un gran numero di difetti e micro-fessure, come il conglomerato bituminoso, si verifica un'interazione tra i processi di crescita delle micro-fessure che provoca la localizzazione della deformazione in una banda molto stretta, dove avviene la dissipazione di energia, mentre il materiale, al di fuori di questa banda, si comporta in modo elastico e lineare. Secondo i concetti della meccanica del continuo, si può affermare che in questa banda (chiamata zona di processo), si verifica una riduzione di capacità portante come conseguenza di un incremento di deformazione anelastica.

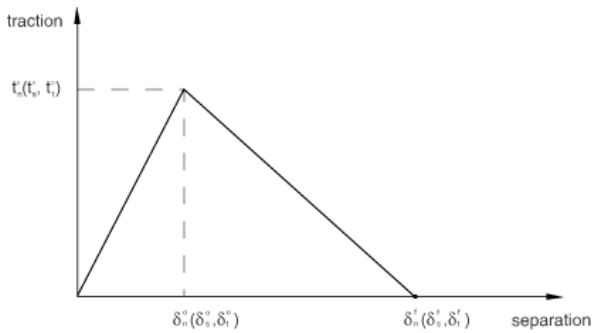


Figura 5-11 - Tipica legge di trazione-separazione

Questo fenomeno è chiamato incrudimento negativo. Il modello di danno ad esso associato può essere definito in termini di legge

trazione-separazione come rappresentato in Figura 5-11. In questo caso la risposta iniziale del materiale coesivo è supposta essere lineare.

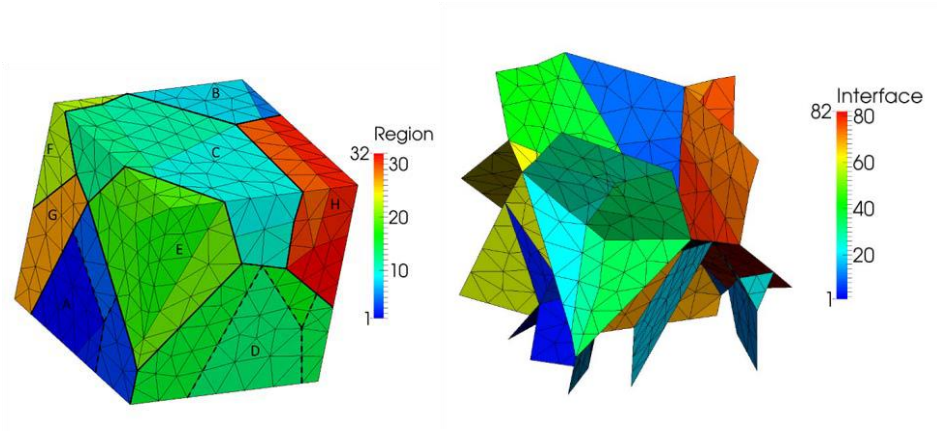
5.7 Generazione di un Cohesive Zone Model

Gli elementi coesivi, come già rappresentato nel par. 5.6.2, sono ampiamente utilizzati nella modellazione della frattura in diversi tipi di materiali e circostanze. L'implementazione di questo tipo di elementi in un modello numerico è stata resa possibile solo nell'ultimo decennio[5] e ha generato un rapido sviluppo delle tecniche di modellazione nella meccanica della frattura. In particolare vengono adoperati due approcci differenti a seconda che sia noto o meno il percorso di frattura: nel primo caso si preferisce inserire manualmente delle cuciture nel modello mediante utilizzo di elementi coesivi; nel secondo, invece, si ha la formazione di una Cohesive Zone Model (CZM), ovvero di una zona in cui i singoli elementi finiti sono contornati di elementi coesivi di spessore nullo (o quasi).

In questa sede, vista l'estensione dell'argomento trattato e per semplicità, si tratta unicamente l'implementazione di elementi coesivi mediante CZM, tralasciando la più ordinaria creazione di interfacce con interposizione di elementi coesivi ad un approfondimento autonomo del lettore anche sui più comuni manuali dei software di modellazione ed analisi ad elementi finiti.

Nel caso di specie, si è utilizzato il programma d'inserimento elementare discontinuo DEIProgram [43] per applicazioni generiche. Sviluppato dal prof. T.J. Truster dell'Università del Tennessee, questo programma è scritto in MATLAB per l'inserimento di elementi di interfaccia spessore nullo, qui definiti come "accoppiatori", in specifiche regioni della mesh di elementi finiti. Un esempio di ciò che genera tale algoritmo è rappresentato in Figura 5-12.

[5] E.g. Abaqus Release Notes (v6.5)



a) *b)*

Figura 5-12 - Dominio policristallino contenente elementi tetraedrici: a) mesh 3D; (b) elementi coesivi inseriti tra tutti i grani e alcuni sottogruppi[43]

La duplicazione dei nodi per consentire l'introduzione degli accoppiatori è trattata in modo sistematico, impiegando solo operazioni topologiche sulla connettività dell'elemento originale della mesh per eseguire l'inserimento dell'elemento accoppiatore. Questo metodo può essere applicato a problemi con due o tre dimensioni e con elementi finiti di forma generica con pochi input da parte dell'utente. Gli accoppiatori possono essere inseriti selettivamente all'interno di regioni specifiche o lungo interfacce specifiche. Inoltre, diversi tipi di accoppiatori come così come diverse proprietà del materiale possono essere assegnate direttamente a questi particolari insiemi di elementi finiti, fornendo un mezzo intuitivo per definire esaurientemente la descrizione della nuova mesh con le interfacce per l'analisi. La teoria alla base dell'inserimento di accoppiatori di interfaccia è riassunta di seguito.

5.7.1 Definizioni topologiche

Si consideri un dominio costituito da una mesh conforme di *elementi* finiti in due (2D) o tre (3D) dimensioni nello spazio. Durante le seguenti discussioni, le entità topologiche sono identificate da composizione in *corsivo*. Ogni *elemento* nella mesh è definito da un insieme di *nodi* che sono punti, all'interno del *dominio*, associati alle loro particolari coordinate; si osservi l'esempio 2D mostrato in nella Figura 5-13. In 2D, una mesh contiene un insieme di *elementi*

triangolari e quadrilateri, mentre in 3D, una mesh contiene solitamente *elementi* tetraedrici o esaedrici. Nella Figura 5-13, i *nodi* sono designati da numeri e gli *elementi* sono indicati con lettere minuscole. Ad esempio, l'*elemento* a è composto dai tre *nodi* 1, 4 e 5. I bordi degli *elementi* 2D sono definiti da un set di segmenti che collegano i *nodi* due a due e le *facce* degli *elementi* in 3D sono definite dall'insieme di *nodi* collegati da bordi che formano un anello chiuso all'interno di un singolo piano nello spazio. Il termine sfaccettatura è applicato per riferirsi a uno spigolo in 2D o a una faccia in 3D nelle descrizioni algoritmiche che seguono.

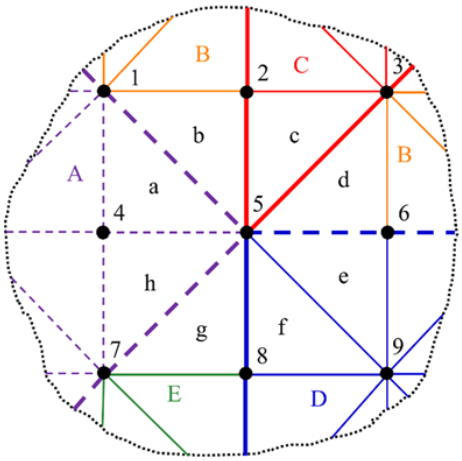


Figura 5-13 - Reti di contenimento degli elementi finiti conformi[43]

In aggiunta alle superiori caratteristiche standard associate alla discretizzazione degli elementi finiti, si definisce una *regione* come insieme contiguo di *elementi* all'interno del *dominio*, che in generale può essere composto da sottodomini non convessi che consistono in insiemi di elementi spazialmente disgiunti. Ogni *elemento* nel *dominio* è un membro di una ed una sola regione. Nella Figura 5-13, le *regioni* sono indicate con lettere maiuscole e gli *elementi* appartenenti a ciascuna regione condividono lo stesso colore. Alcuni esempi di *regioni*, in un contesto di modellazione ad elementi finiti, includono i grani all'interno di un policristallo, gli aggregati in un conglomerato bituminoso, le fibre e la matrice circostante in un materiale composito, il calcestruzzo e l'acciaio nel cemento armato, e così via, dove ogni regione ha in genere proprietà dei materiali differenti. Tuttavia, in questo algoritmo il concetto di *regione* esula da un significato fisico e

si manifesta come un costrutto puramente geometrico per consentire applicazioni di carattere generale. Il ruolo svolto dalle *regioni* è al centro dell'algoritmo per l'inserimento degli “elementi d’interfaccia". Le sfaccettature di tutti gli *elementi* nel *dominio* possono essere separate in tre gruppi disgiunti:

- un primo set, costituito da quelle facce che si trovano sul confine del dominio e che sono adiacenti ad uno e uno solo elemento;
- un secondo set, cui appartengono quelle sfaccettature che si trovano tra elementi di due regioni diverse, che sono denominate interfacce. Questo set è ulteriormente suddiviso in base a coppie di regioni, ad esempio l'interfaccia (A, B) è l'insieme di tutte le facce interposte tra la regione A e la regione B;
- un terzo insieme è composto da quelle sfaccettature che si trovano tra elementi della stessa regione. Tali sfaccettature appartenenti alla regione C saranno denotate come intrafaccia (C), e così via.

Le interfacce sono mostrate come segmenti di linea spessa in Figura 5-13 mentre le intrafacce vengono visualizzate come segmenti di linea sottili.

5.7.2 Algoritmo di inserimento elementi coesivi

Viene presentato un algoritmo basato su topologia per l'inserimento di *accoppiatori* lungo le *interfacce* o *intrafacce* nel *dominio*. Nella letteratura, tali entità computazionali sono tipicamente denominate "zero-thickness elements" o "elementi d’interfaccia". In questa sede si preferisce applicare il termine *“accoppiatore”* per distinguere dalle altre definizioni topologiche fatte nella precedente sezione e fornire una trattazione più ampia di entità computazionali. Pertanto, un *accoppiatore* è definito come un’unità topologica composta esattamente da nodi di due elementi tra loro adiacenti attraverso un'interfaccia o intrafaccia. L'accoppiatore è generato duplicando i nodi che si trovano sulla sfaccettatura condivisa dai due elementi al fine di dividere efficacemente la mesh una superficie passante per quella sfaccettatura. Questi accoppiatori appaiono comunemente come realizzazioni numeriche di formulazioni discontinue per la modellazione di equazioni differenziali alle derivate parziali. Il trattamento di tali formulazioni va comunque oltre lo scopo

di questa tesi. La caratteristica comune di questi metodi di interpolazione discontinua è la richiesta di dati topologici aggiuntivi oltre i soli *nodi* e elementi della mesh Partendo da una *mesh* conforme di *elementi* finiti, l'inserimento di accoppiatori si esegue con riferimento alle *interfacce* e alle *interfacce* tra varie *regioni*. La *regione* è un'entità geometrica naturale per definire la posizione desiderata degli accoppiatori. Per esempio, quando si modella la frattura per separazione in materiali compositi fibrosi, le interfacce tra le diverse regioni del materiale sono la posizione desiderata per l'inserimento degli accoppiatori. Allo stesso modo, le intrafacce, interne ad una determinata regione, sono il luogo in cui inserire gli accoppiatori quando si utilizza il metodo discontinuo di Galerkin o quando in genere si simula la propagazione della cricca con i CZM. I dati di input per l'algoritmo sono semplicemente le coordinate spaziali dei nodi, l'elenco delle connettività di ciascuno elemento ai nodi e all'elenco di elementi appartenenti a ciascuna regione. Queste informazioni topologiche sono generalmente ricavabili da quasi tutti i pacchetti software di generazione mesh di elementi finiti, il che significa che non sono necessarie conoscenze specifiche di programmazione per poter implementare una CZM. Un'altra informazione fondamentale per determinare in quali posizioni topologiche inserire gli accoppiatori è l'elenco delle interfacce e delle intrafacce con riferimento alle regioni considerate. Ad esempio, l'interfaccia tra una regione A e una regione di B, potrebbero essere indicate mediante etichetta d'interfaccia (A, B); in Figura 5-13, ciò è indicato dalle linee tratteggiate tra queste regioni. Queste sfaccettature dove gli accoppiatori devono essere inseriti sono chiamate sfaccettature "tagliate". Allo stesso modo, le intrafacce (A) all'interno della regione A sono anch'esse tratteggiate nella Figura 5-13 sempre per indicare che verranno tagliate. Lo scopo dell'algoritmo è quindi determinare il set di accoppiatori da inserire e il set di nodi da duplicare attraverso un processo automatizzato basato sulla topologia della mesh.

L'aspetto cruciale della procedura di inserimento è insito nella duplicazione del nodo, su cui si basa il concetto di *settori* di *elementi* che circondano il *nodo* in esame. Due elementi si dicono appartenenti a un settore se la sfaccettatura tra loro condivisa non è una

sfaccettatura tagliata, vale a dire che non è stata scelta per l'inserimento di un accoppiatore. Un *settore* può essere quindi definito come il più grande insieme di elementi che soddisfano questa condizione; un singolo elemento costituisce un settore se vengono tagliate tutte le sfaccettature di quell'elemento che condivide il nodo in esame. Anche l'unione di tutti i settori è uguale all'insieme di tutti gli elementi che circondano il nodo in esame. In generale, un settore sarà costituito da tutti gli elementi per una singola regione solo se tutte le *interfacce* sono collegate a quella regione devono essere tagliate; solo in caso contrario, un *settore* può essere costituito da *elementi* di più *regioni*. Questa definizione assicura che venga ottenuto un singolo *settore* nei casi di un *nodo* collegato solo con sfaccettature tagliate su una singola superficie 3D. Pertanto, il nodo non sarebbe duplicato e il collegamento tra elementi rimarrebbe continuo su quel nodo.

Facendo riferimento alla *mesh* nella Figura 5-13, gli *elementi* b, c e d appartengono ad un *settore*, poiché gli accoppiatori sono inseriti lungo l'interfaccia (A, B) e l'interfaccia (B, D). Nella discretizzazione degli elementi finiti, è necessario che ciascuno di questi *elementi* abbia una interpolazione continua del campo della soluzione. Quindi, il coefficiente nodale della soluzione associato a questo nodo al confine deve essere identico per ciascuno dei tre elementi cui appartiene, in modo che il *settore* resti "solido". Gli elementi in altri settori avranno un'interpolazione discontinua, dovuta proprio all'inserimento degli accoppiatori, quindi il valore nodale del campo della soluzione dovrebbe essere indipendente o distinto tra i settori. Per l'esempio mostrato, la duplicazione del nodo 5 su ogni regione non soddisfa il requisito di continuità; questo porta a un errore discretizzazione mostrata nella Figura 5-14 (a), con spazi aperti tra gli elementi *b, c* e *d*. Usare una discretizzazione così fatta porterebbe ovviamente a risultati numerici errati. In una modellazione corretta, una singola copia del nodo 5 dovrebbe essere assegnata a questi tre elementi che appartengono ad un unico settore, come indicato dalla campitura tratteggiata nella Figura 5-14 (b). Questa situazione si presenta perché le regioni B e C sono destinate a rimanere tra loro collegate senza aggiungere accoppiatori lungo l'interfaccia (B, C). Al contrario, all'interno della regione A, il nodo 4 sarà duplicato tante volte per

quanti sono gli elementi ad esso afferente, dal momento che ogni elemento costituisce un settore dovuto all'inserimento di accoppiatori intrafaccia.

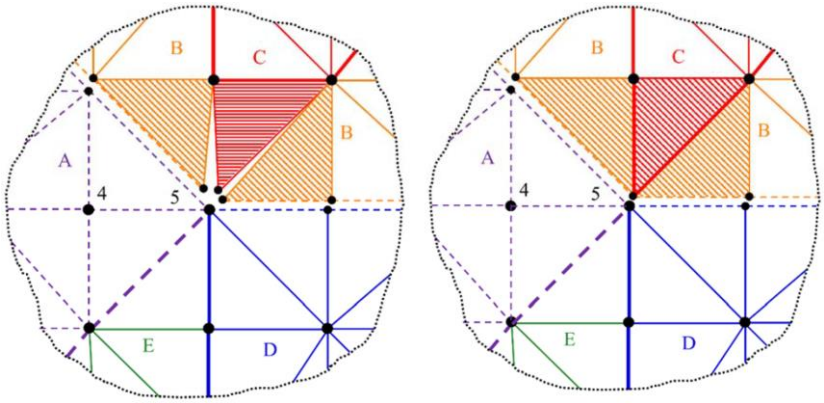


Figura 5-14 - Duplicazione del nodo: (a) discontinuità non corretta ottenuta utilizzando le regioni; (b) continuità corretta e ottenuta utilizzando i settori [43]

L'algoritmo di inserimento degli accoppiatori è schematizzabile in sei fasi, che sono riassunte di seguito:

a) costruire il set di elementi collegati a ciascun nodo;
b) definire le regioni e tutti gli aspetti della mesh come contorno, interfaccia o intrafaccia;
c) designare tutte le sfaccettature dell'interfaccia tagliata, dove devono essere inseriti gli accoppiatori;
d) duplicare i nodi in base ai settori per le interfacce;
e) duplicare i nodi per le interfacce;
f) costruire la nuova connettività dei nodi agli accoppiatori secondo i modelli specificati.

Per una descrizione più specifica di ciascuna di queste fasi si rimanda alla trattazione del prof. T.J. Truster [43].

6 Proposta di un approccio innovativo per la modellazione mesostrutturale del c. b.

Nel presente capitolo viene trattata la parte propositiva della ricerca, frutto di uno studio animato dalla volontà di introdurre nei modelli numerici attuali alcune variabili finora trascurate.

Vale la pena ricordare come, da un punto di vista analitico, il c.b. è un materiale composito non strutturato, fortemente disomogeneo e anisotropo, composto da aggregati con un determinato assortimento granulometrico, distribuiti casualmente all'interno di una matrice viscosa costituita dal bitume che riempie, ma non del tutto, gli spazi intergranulari, lasciando quindi dei vuoti (Figura 6-1).

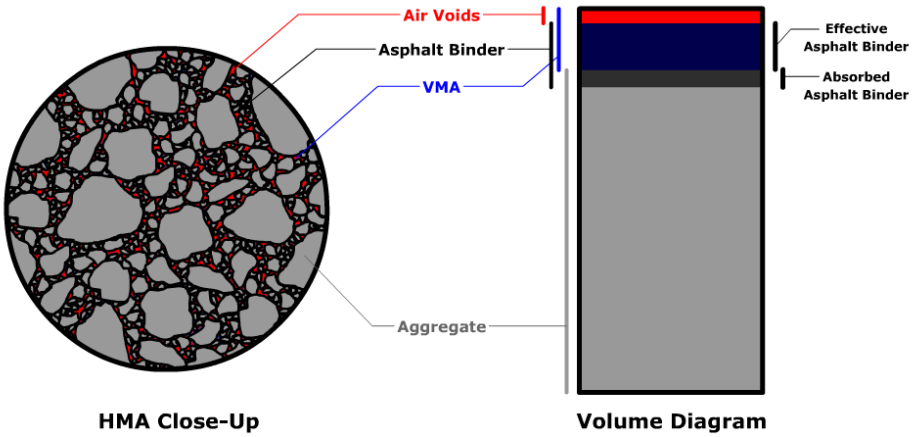


Figura 6-1 - Composizione del conglomerato bituminoso[6]

Le caratteristiche fisiche e meccaniche che possono rappresentare globalmente la *performance* del materiale sono strettamente correlate alle caratteristiche "mesostrutturali" dello stesso, intendendo con questo termine una serie di fattori che intervengono a livello di "mesoscala", ovvero di una scala "intermedia", nella quale può essere messa a fuoco l'interazione tra le diverse fasi del materiale.

Facendo seguito alle criticità evidenziate nei modelli mesostrutturali presenti in letteratura, è emersa la necessità di creare una nuova rappresentazione virtuale del sistema multifase al fine di

[6] HMA Weight-Volume Terms and Relationships, Pavement Tools Consortium - https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/design/mix-design/hma-weight-volume-terms-and-relationships/

adottare alcuni accorgimenti atti ad eliminare, o perlomeno attenuare, le criticità già esposte nel par. 4.3.5.

Gli algoritmi "classici" utilizzano tecniche di *mesh* standard e strutturate di tipo *top-down*, perché legate direttamente alla geometria del modello in modo che la *mesh* risultante riempia e si adatti alla geometria stessa. Questa metodologia porta con sé, però, il deficit di poter gestire la *mesh* solo attraverso dei parametri imposti sul contorno della regione dalla quale viene generata, senza alcuna possibilità di controllo locale. La meshatura *top-down* di un materiale multifase è, quindi, possibile solo se sono note a priori le caratteristiche geometriche, nonché le posizioni nello spazio, di tutti gli elementi. Nel caso specifico del c.b. dove, per converso, gli aggregati non hanno né una collocazione né una forma geometrica predeterminate, sarebbe riduttivo, se non addirittura errato, ricondurre gli elementi a forme geometriche semplificate.

L'insussistenza di vincoli geometrici nella matrice del c.b. costituisce la circostanza posta al vaglio del presente studio che, tra l'altro, rende agevole l'utilizzo di un algoritmo innovativo in cui si assiste ad un capovolgimento dei fattori posti in gioco: se, nel caso ordinario, a fronte di una geometria predeterminata abbiamo una mesh variabile, viceversa, nella nuova tecnica, sarà la mesh ad essere un riferimento definito a priori e la geometria, variando, si adatterà ad essa (Figura 6-2).

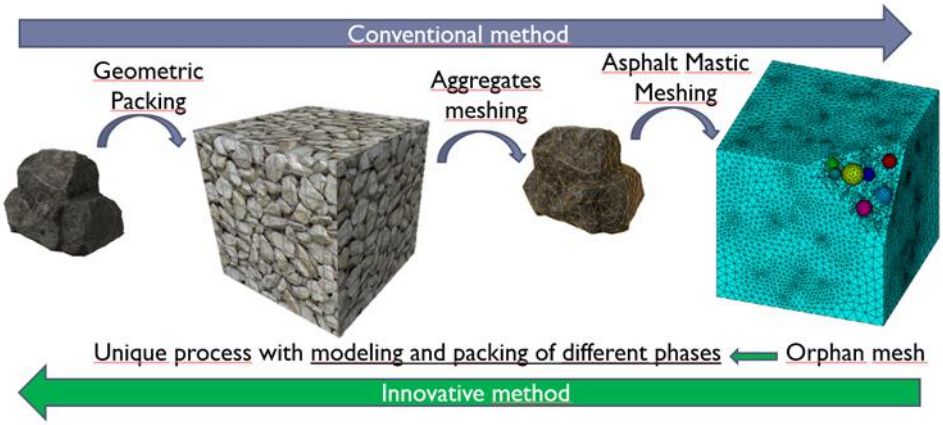


Figura 6-2 - Differenza tra l'approccio tradizionale e quello innovativo

Nella maglia preventivamente determinata, gli oggetti generici che rappresentano le diverse fasi del sistema, si ricavano mediante

l'assegnazione dell'attributo di aggregato, bitume o vuoto ad ogni elemento. Tale metodologia, seppur limitata dalla precisione intrinseca della mesh a causa della dimensione fisica dei suoi elementi, consente di trovare facili soluzioni a problemi precedentemente irrisolti. Il principale vantaggio di questa tecnica, rispetto alle precedenti in letteratura, risiede nella sua stabilità e nell'assenza di iterazioni dovute ai tentativi non soddisfacenti di collocazione degli aggregati.

6.1 Modellazione voxel ibrida

Ricollegandosi a quanto sinteticamente anticipato nel par. 4.3.1.2, dove viene riportata una descrizione sintetica del concetto di voxel, si propone una visione estensiva della metodologia di modellazione con i voxel che sia più adatta alla rappresentazione di materiali multifase. Allo stato attuale l'utilizzo dei voxel è limitato ad una rappresentazione grafica approssimata della realtà, determinata dalla risoluzione del campionamento dell'oggetto da riprodurre. Si pensi ad esempio alle CT 3D (tomografie computerizzate tridimensionali), come nell'esempio riportato in Figura 6-3a, dove l'oggetto è rappresentato tramite una moltitudine di punti cui è associata una dimensione nello spazio.

a) *b)*

Figura 6-3 – a) Esempio di visualizzazione di una Tomografia computerizzata 3D; b) Oggetto stampato in 4D

Un'altra applicazione, ancora più recente, riguarda alcune tecnologie poste alla base delle moderne stampanti 3D e volte a riprodurre oggetti, aggiungendo una "quarta" dimensione ovvero associando ad un volume elementare altre proprietà come quella del colore, di cui si riporta un esempio in Figura 6-3b.

Tornando alla modellazione dei materiali multifase, da un confronto della sezione di un provino reale in c.b. e di una rappresentazione numerica ad elementi finiti dello stesso, come rappresentato in Figura 4-9, si riscontrano alcune differenze non trascurabili, con particolare riguardo alla geometria degli elementi. Questa discrasia si traduce inevitabilmente in una forte approssimazione del modello numerico che inficia la possibilità di un'applicazione affidabile idonea agli scopi della ricerca. Attualmente, le metodologie più diffuse per la rappresentazione numerica del c.b. sono due:

- la prima consiste nella modellazione geometrica degli aggregati e nella loro disposizione casuale secondo le tecniche riportate nel par. 4.3.1 all'interno di un volume di controllo. Questa metodologia è particolarmente usata per la modellazione ad elementi finiti, cui ovviamente segue la meshatura con la conseguente discretizzazione del modello geometrico;
- l'altra consiste nell'acquisizione di immagini tomografiche del provino per effettuare, successivamente, una ricostruzione tridimensionale ma, in questo caso, al solo fine di valutare le proprietà geometriche dello stesso.

La prima metodologia, come descritto nel par. 4.3.1, non consente di ottenere risultati eccellenti ed è, inoltre, contraddistinta da elevati oneri computazionali per la definizione del modello; la seconda, per converso, soffre di problemi tipici del campionamento.

In particolare, nel campo 2D, il campionamento di un cerchio in una matrice di pixel presenta delle imperfezioni ai bordi e, maggiore sarà il numero dei pixel necessari per rappresentare il cerchio, tanto più lo stesso apparirà con un contorno definito. Al contempo però un elevato numero di pixel aumenta notevolmente gli oneri computazionali per la visualizzazione dell'oggetto. Una possibile tecnica capace di sopperire tale inconveniente e, contestualmente,

trovare un giusto compromesso, è l'anti-aliasing, attraverso il quale il contorno di un oggetto è sfumato e ciò consente di attribuire ad ogni pixel una gradazione di colore in funzione del grado di riempimento del pixel stesso con l'oggetto, come riportato in Figura 6-4.

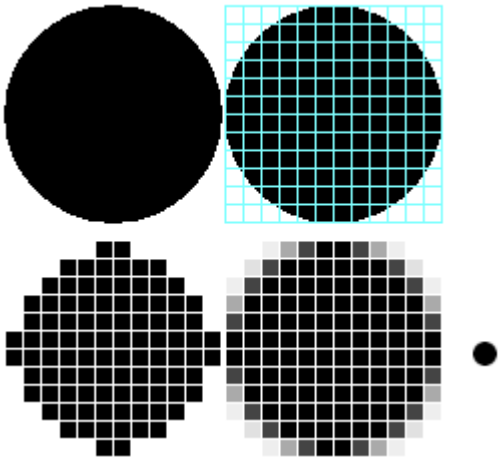
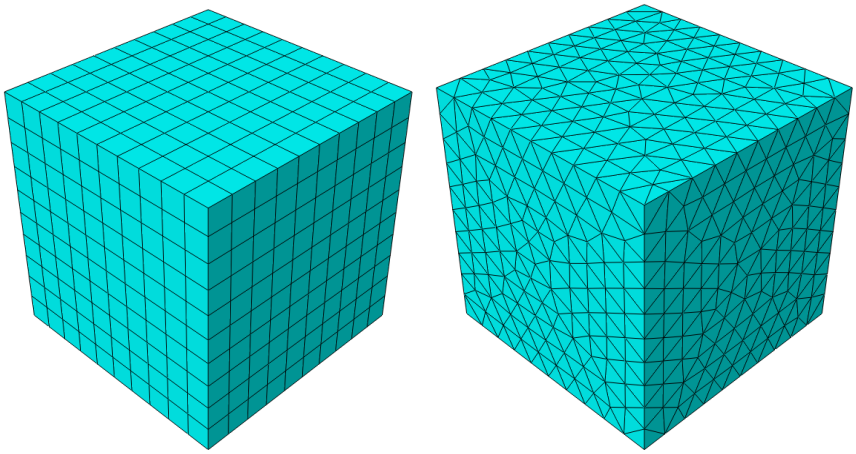


Figura 6-4 - Esempio di campionamento in pixel e della tecnica di anti-aliasing

Se si pensa al cerchio sopra raffigurato come l'inclusione di un elemento all'interno di una matrice volta a modellare il sistema con elementi finiti, si comprende che aumentare eccessivamente il loro numero comporti, quale diretta conseguenza, un'eccessiva dilatazione dei tempi di calcolo e che operazioni come l'anti-aliasing attribuirebbero agli elementi finiti sul contorno proprietà meccaniche intermedie a quelle delle singole fasi complicando inutilmente il problema, oltre ad essere una soluzione piuttosto artificiosa.

Per fronteggiare problemi simili, i modelli FEM fanno uso di altre forme più elementari, come quella triangolare, che consentono di campionare con più precisione l'oggetto, senza la necessità di ulteriori complicazioni. Da qui nasce l'idea di utilizzare un modello ad elementi finiti predeterminato quale base per il campionamento di un oggetto. Infatti, considerando che non è nota a priori né la posizione né la forma di un aggregato all'interno della miscela, si è pensato che definire la geometria di un aggregato come una sequenza di porzioni elementari di spazio (voxel) tra loro vicine, non comporti particolari limitazioni se non quelle associate alla dimensione minima degli stessi elementi che determina la risoluzione dell'oggetto rappresentato.

La modellazione voxel qui adoperata viene definita ibrida poiché perde la classica struttura matriciale 3D, composta da elementi di forma cubica, e acquista una forma meno regolare come assemblaggio di elementi tetraedrici (vedi confronto di Figura 6-5), racchiudendo in sé sia la praticità di un modello voxel sia le potenzialità e la flessibilità di un modello FEM.



a) *b)*

Figura 6-5 - Confronto di una matrice voxel classica (a) con una ibrida (b)

I vantaggi dell'utilizzo di un modello ibrido sono molteplici e dovuti principalmente agli algoritmi che possono essere utilizzati per la generazione casuale di aggregati che, come verrà illustrato nei paragrafi successivi, risulta così più veloce ed efficiente rispetto ai metodi tradizionali. Oltretutto, con tale approccio gli aggregati possono assumere forme generiche che sono più attinenti alla realtà senza dovere ricorrere a forme precostituite (come sfere o ellissoidi) già di largo uso nella letteratura.

6.2 La metodologia proposta

La creazione di un modello numerico del c.b. ha certamente rappresentato il profilo più impegnativo della ricerca durante il periodo di studio. In via del tutto preliminare, giova in questa sede evidenziare quali sono state le ragioni che hanno comportato un notevole dispendio di risorse soprattutto da un punto di vista temporale (tale fase ha, infatti, occupato la quasi totalità del periodo

dell'attività di ricerca) e che possono essere sintetizzati nei seguenti elementi chiave. Per un verso, l'impossibilità di confrontare altre autorevoli fonti ha certamente giocato un ruolo cruciale in questa delicata fase (anche semplicemente per l'impossibilità di potervi attingere e prendere taluni spunti di riflessione e/o di critica), sebbene contestualmente, e qui il rovescio della medaglia, ciò abbia rappresentato quella chiave di volta capace di attribuire alla ricerca un quid pluris, rendendola più interessante e certamente innovativa e attribuendole un fascino finora inesistente in letteratura; per l'altro, l'assenza di strumenti specifici di gestione topologica della mesh riscontrata nei software in commercio non ha contribuito a facilitare la risoluzione del problema anzi, insieme al precedente punto, ha causato un notevole rallentamento della ricerca a causa delle difficoltà di implementazione di quanto è stato ideato.

Messi da parte tali profili, è possibile anticipare, in via del tutto sintetica ed approssimativa, una schematizzazione del procedimento ideato per la creazione del modello mesostrutturale del c.b. che può essere suddiviso nelle seguenti macro-fasi:

- generazione della mesh;
- generazione degli aggregati (*packing algorithm*);
- generazione del mastice di bitume;
- generazione del film di bitume;
- generazione dei vuoti.

Prima di scendere nel dettaglio della metodologia proposta, è opportuno soffermarsi sugli strumenti attraverso i quali è stato possibile realizzare il modello oggetto della ricerca.

In una prima fase, la stesura degli algoritmi è stata gestita con l'ausilio del "Partial Differential Equation Toolbox" del software scientifico "Matlab" di Mathworks. Per quanto concerne tale software occorre sottolineare come, sebbene la programmazione in linguaggio Matlab sia molto agevole, il PDE toolbox possieda una struttura rigida che pone troppi vincoli all'operatore e, in particolare, non consente una completa manipolazione degli elementi finiti oltre ad una semplice attribuzione di proprietà specifiche per ogni elemento. Tali deficit hanno reso necessario esplorare nuove soluzioni software. Dopo una spedita e, al contempo, accurata valutazione degli applicativi presenti

in commercio, si è optato per l'utilizzo congiunto di due soluzioni informatiche: l'ambiente di calcolo numerico Matlab e il software di analisi ad elementi finiti "Abaqus" di Dassault Systèmes.

Gli applicativi software sopra menzionati sono stati utilizzati a fasi alterne durante l'intero processo elencate sinteticamente come segue: la fase iniziale di creazione della mesh è delegata ad Abaqus attraverso script appositamente sviluppati, alcuni in Matlab altri in Pyhton, e le informazioni della mesh sono state esportate per essere successivamente trattate; in una seconda fase, su Matlab, viene gestita la quasi totalità dell'algoritmo di packing con la creazione degli aggregati nel rispetto di un fuso granulometrico e di alcuni criteri di forma; nella terza fase, sempre in ambiente Matlab, viene generato il mastice di bitume ricoprendo gli aggregati con un preciso criterio fino a quando non si raggiunge il prefissato rapporto tra i vari componenti del modello; la penultima fase prevede la creazione del film di bitume che viene gestita tramite l'implementazione dell'algoritmo già proposto da T.J. Truster [55]; infine, a completamento del modello, gli elementi finiti ottenuti per differenza rispetto ai precedenti steps costituiscono i vuoti che possono essere eliminati oppure è anche possibile attribuirvi proprietà meccaniche trascurabili.

Una volta completata l'elaborazione del provino numerico, le informazioni sullo stesso sono nuovamente importate in Abaqus al fine di elaborare le simulazioni ad elementi finiti.

6.2.1 Generazione della mesh

Diversamente da quanto si è solito aspettarsi, la creazione della mesh, invece di occupare l'ultimo stadio del tradizionale processo di modellazione, costituisce, in questa circostanza, la prima fase del processo di generazione del modello mesostrutturale del c.b. Pur avendo assistito nel corso dell'ultimo ventennio ad un passaggio graduale dall'uso di modelli bidimensionale a quelli tridimensionale, si è preferito, sin da subito, iniziare a sperimentare il presente approccio con un numero di dimensioni più attinente alla realtà. Tale scelta è stata abbastanza combattuta poiché l'utilizzo di una mesh tridimensionale ha complicato notevolmente la definizione del

problema ma, come contropartita, ha reso il presente approccio subito attuale ed al passo con gli altri modelli esistenti in letteratura.

Preliminarmente alla generazione della mesh è necessario provvedere alla definizione della forma e delle dimensioni dell'oggetto da modellare. In questa sede sono state utilizzate esclusivamente forme prismatiche o cilindriche (per attinenza ai classici provini in c.b.), ma la generalità dell'approccio consente la generazione di modelli di qualsivoglia forma. Definita la regione di spazio da modellare, è utile prefissare anche alcuni vincoli sul contorno per imporre il passaggio dei nodi della mesh su particolari linee od aree. Tali vincoli possono essere scelti per rappresentare correttamente le impronte di carico od i supporti esterni in funzione della tipologia di prova alla quale sottoporre il modello.

La generazione della mesh, per quanto sia un'operazione semplice (grazie all'ausilio dei moderni software di modellazione fem), richiede la dovuta attenzione riguardo alla scelta dei parametri che controllano l'algoritmo e la tecnica di meshatura automatica. Innanzitutto, dato che la mesh dovrà rappresentare un sistema multifase eterogeneo ed anisotropo, è opportuno che la stessa non possieda alcuna struttura apparentemente regolare e, pertanto, la tecnica di meshatura deve essere libera, ovvero non estrusa o "spazzata" (swept). Solitamente i software di meshatura automatica hanno un algoritmo che consente di ottenere una mesh meno fitta nella parte interna degli oggetti modellati (dove le variazioni in termini di tensioni e deformazioni sono generalmente più modeste) al fine di ottimizzare i tempi di calcolo.

Nel caso in questione, invece, l'intento è quello di avere una mesh costituita da elementi di simili dimensioni e, per ottenere tale risultato, è necessario modificare opportunamente i parametri dell'algoritmo di meshatura impostando un fattore di crescita degli elementi più interni uguale ad uno ovvero disattivando tale funzione. In tal modo si evitano efficacemente situazioni in cui l'algoritmo di generazione degli aggregati potrebbe comportarsi diversamente in funzione della porzione di mesh sulla quale si trova ad agire.

In ultimo, ma non per importanza, la tipologia di elementi utilizzati in questa sede è il tetraedro (la più semplice e versatile nella modellazione tridimensionale) e la loro dimensione massima, scelta a

priori come ulteriore parametro della mesh, deve essere tale da rendersi compatibile con la modellazione degli aggregati di minore grandezza, in considerazione dei limiti prefissati in letteratura [27], [28].

Scendendo maggiormente nel dettaglio, la creazione della mesh (che si ricorda essere solo il primo step della metodologia proposta) può essere schematizzata nelle seguenti operazioni:

- in ambiente Abaqus, si costruisce un solido geometrico di forma e dimensioni pari al provino desiderato;
- si impostano eventuali vincoli ai quali agganciare i nodi della mesh;
- si genera una mesh tetraedrica con elementi finiti di dimensioni massime prefissate (in base ai valori di letteratura che discriminano il mastice di bitume dagli aggregati grossi);
- si rende orfana la mesh, ovvero si dissocia la stessa dalla geometria di partenza;
- si esporta la lista dei nodi, con le informazioni sulle loro coordinate nello spazio, e la lista dei tetraedri, espressa in termini di connettività dei nodi (elenco dei nodi appartenenti ad ogni singolo tetraedro).

I precedenti passaggi sono stati implementati attraverso dei codici in Matlab che invocano altri script in Python e che interagiscono in modo automatico su Abaqus, così da rendere più celere l'attività di ricerca.

Come anticipato nei precedenti paragrafi, la presente fase non è banalmente limitata alla sola costruzione della mesh, ma si compone di alcune operazioni articolate sulla mesh che sono propedeutiche alle successive fasi del processo. Si riportano di seguito le operazioni di preliminari di calcolo sulla mesh preventivamente creata:

- in ambiente Matlab, si importano le informazioni precedentemente esportate da Abaqus;
- si crea una lista delle facce, contenente l'informazione dei nodi appartenenti ad ogni singola faccia e si differenziano le facce appartenenti al confine del modello da quelle interne;
- si creano le informazioni sull'associazione tra tetraedri e facce (e viceversa): un elenco delle facce appartenenti ad ogni singolo

tetraedro ed un elenco dei tetraedri connessi ad ogni singola faccia;

- si creano le informazioni relative all'adiacenza tra i tetraedri in termini di connettività: elenco dei quattro tetraedri adiacenti ad ogni singolo tetraedro (ovviamente per i tetraedri posti sul confine del modello almeno uno dei quattro valori sarà nullo);
- si creano le informazioni sulla connettività dei nodi (informazione inversa e duale rispetto alla connettività dei tetraedri): per ogni singolo nodo, un elenco dei tetraedri ad esso afferenti e il numero totale di elementi che lo circondano;
- si calcolano alcune caratteristiche geometriche degli elementi della mesh: il volume e il baricentro di ogni tetraedro, la superficie di ogni faccia e gli angoli solidi formati da ogni vertice per ogni tetraedro.

Per un maggiore approfondimento sulle modalità di calcolo delle informazioni di cui sopra si rinvia al paragrafo 5.5.

6.2.2 Criteri di valutazione del rapporto tra le fasi e della granulometria

Uno degli aspetti più innovativi della metodologia presentata riguarda la modellazione delle tre fasi del sistema, (aggregati, bitume e vuoti) e, quindi, rispetto ai modelli esistenti in letteratura, viene posta attenzione alla presenza dei vuoti che non è più trascurata ma che, di più, ottiene il suo giusto peso all'interno del modello.

Per quanto concerne tale aspetto, si è pensato di attuare un'approssimazione analoga a quella già esposta per gli aggregati al par. 4.3, suddividendo i vuoti presenti nella miscela in funzione della loro dimensione per ottenere macro-vuoti e micro-vuoti. I primi sono rappresentati all'interno del modello, i secondi sono considerati indistintamente all'interno del mastice di bitume. La suddivisione degli aggregati in fini e grossi, prassi comune ed ampiamente avallata dai ricercatori, è stata anche sposata in questa tesi. Tali approssimazioni, meglio rappresentate in Figura 6-6, costituiscono una "nuova" fase omogeneizzata: il mastice bituminoso, composto quindi da aggregati fini, bitume e micro-vuoti.

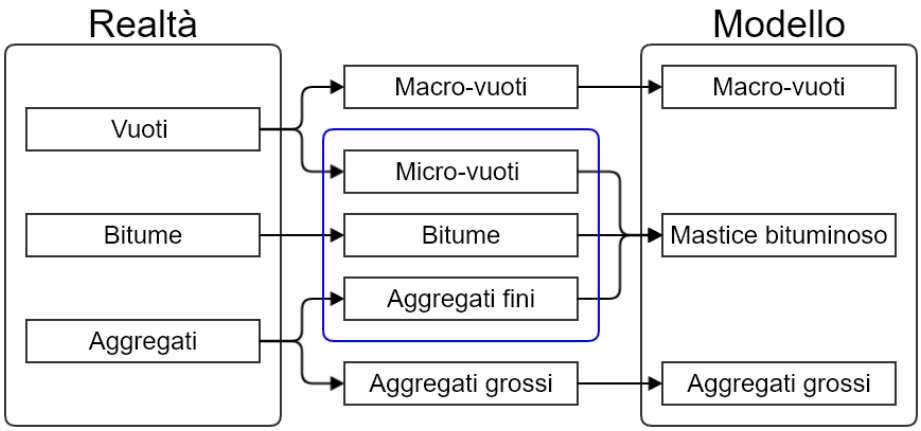


Figura 6-6 - Approssimazioni del modello

Il mastice bituminoso racchiude in sé molte analogie con il c.b., seppur le proprietà fisiche e meccaniche che contraddistinguono questi due materiali siano differenti, circostanza da imputare principalmente alla diversa composizione dei materiali che li costituiscono. Le suddivisioni appena descritte, sia per gli aggregati sia per i vuoti, risultano comode anche per poter considerare un'eventuale scalabilità del modello finalizzata ad ampliare lo studio e la conoscenza dei materiali multifase, come rappresentato nel par. 6.3.

Per la gestione del modello e della mesh, dal momento che ogni elemento finito ha un suo volume ma non un suo peso (finché non gli venga attribuito un peso specifico), è indispensabile rendere coerenti tutte le informazioni a supporto del modello stesso, omogeneizzandole in termini volumetrici. Noto quindi il volume totale del modello V_T (ottenibile come somma del volume di ogni elemento finito del quale è composto), il volume complessivamente occupato da aggregati lapidei e bitume è ottenibile come segue:

$$V_{agg}+V_b=V_T(1-v_a) \tag{6-1}$$

Dove v_a è la percentuale dei vuoti sul volume totale della miscela preventivamente divisa per 100.

Tramite alcune semplici operazioni matematiche, la composizione volumetrica delle singole fasi può essere determinata mediante le seguenti formule:

$$V_{agg}=V_T(1-v_a)/[\gamma_{agg}(1/\gamma_{agg} + b/\gamma_b)] \quad (6\text{-}2)$$

$$V_b=V_T(1-v_a)b/[\gamma_b(1/\gamma_{agg} + b/\gamma_b)] \quad (6\text{-}3)$$

$$V_a=V_T \cdot v_a \quad (6\text{-}4)$$

Dove γ_{agg} è il peso specifico degli aggregati lapidei, γ_b è il peso specifico del legante bituminoso e b è la percentuale di bitume espressa in peso rispetto al peso totale degli aggregati.

Supponendo verosimilmente che tutti gli aggregati dell'assortimento granulometrico abbiano lo stesso peso specifico, la percentuale di passante espressa in peso coincide con quella espressa in volume e, pertanto, è possibile ottenere il volume del passante per ogni diametro D_i della curva granulometrica (Figura 6-7) come segue:

$$V_{p,i}=V_a \cdot p_i \quad (6\text{-}5)$$

Dove p_i è il passante, riferito all'unità, al crivello di diametro D_i.

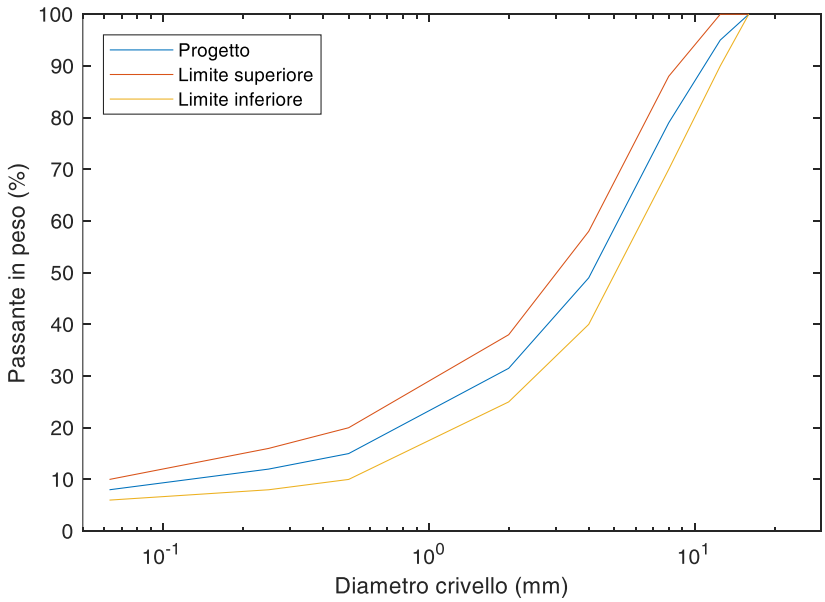


Figura 6-7 - Curva granulometrica diametro-passante (fuso ANAS usura tradizionale tipo A)

Come sopra accennato, il presente approccio adotta la suddivisione degli aggregati in aggregati grossi e fini e, pertanto, interpolando la curva granulometrica V_t-D è possibile determinare il volume dei due gruppi di aggregati.

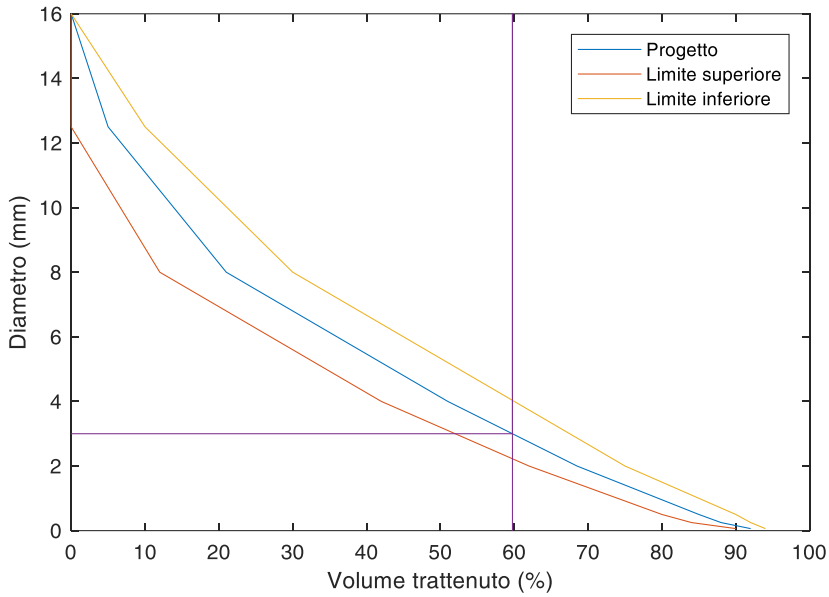


Figura 6-8 - Esempio di trasformazione del fuso granulometrico con D_{lim} = 3 mm.

Dall'esempio illustrato in Figura 6-7, che riporta la curva granulometrica ottenuta come media del fuso ANAS usura tradizionale tipo A, le percentuali di aggregati grossi e fini sono rispettivamente 59.75% e 40.25%, rispetto al volume totale degli aggregati e considerando un diametro limite D_{lim} (discriminante tra aggregati grossi e fini) pari a 3 mm (cfr. Figura 6-8).

Definito il volume della prima fase che costituisce il modello, ovvero quello occupato dagli aggregati grossi, è necessario calcolare il volume delle restanti fasi. Ai fini del calcolo del volume occupato dal mastice di bitume, la variabile ancora incognita è il volume dei micro-vuoti dispersi nel c.b., ovvero quei vuoti che per la loro minuta entità (inferiore alla dimensione scelta per gli elementi finiti) vengono considerati un tutt'uno con aggregati fini e bitume nel modello mesostrutturale.

Non essendo ancora stato condotto uno studio particolareggiato sulla dimensione dei pori nella miscele, allo stato attuale si suppone che la proporzione tra i macro-vuoti ed i micro-vuoti dipenda verosimilmente sia dalla percentuale totale dei vuoti presenti nella miscela sia dalla forma del fuso granulometrico. Tale ipotesi è giustificata dal fatto che, essendo i vuoti distribuiti pressoché

uniformemente nel sistema, una piccola percentuale dei vuoti comporta una minore dimensione degli stessi ma non una corrispondente diminuzione della loro quantità. Se, invece, si prende in esame un conglomerato drenante, l'elevata percentuale dei vuoti è ottenuta facendo mancare all'assortimento granulometrico alcune frazioni di aggregati che donano all'omonima curva una forma ad "S" caratterizzata da un tratto intermedio molto scosceso. In questo caso i vuoti presenti nel sistema non solo hanno una dimensione maggiore ma sono anche comunicanti tra loro.

Si può pertanto supporre che, per conglomerati "chiusi" (con vuoti inferiori al 5%), micro e macro-vuoti siano equamente ripartiti, e, per miscele "aperte", la percentuale dei micro-vuoti si attesti comunque intorno al 2,5÷3 % indipendentemente dalla percentuale totale dei pori.

Si precisa che quanto sopra esposto è, ovviamente, una mera ipotesi frutto di un ragionamento soggettivo che, a tempo debito, dovrà essere suffragata (o, alternativamente, confutata) da un'idonea sperimentazione.

Infine, il volume dei macro-vuoti, ultima fase che costituisce il modello, può essere ottenuto semplicemente come differenza tra il volume totale e il volume preventivamente determinato delle altre fasi.

Al fine di comporre il modello si definisce la seguente procedura che riprende e riassume in parte quanto appena esposto:

- si definiscono/importano i seguenti dati: Volume totale del modello (come somma degli elementi finiti che lo costituiscono); il peso specifico degli aggregati; il peso specifico del bitume; percentuale di bitume (in peso rispetto agli aggregati); il peso specifico del conglomerato costipato o, alternativamente, la percentuale dei vuoti; il fuso granulometrico (percentuale in peso degli aggregati in funzione del loro diametro); il diametro limite che discrimina gli aggregati grossi da quelli fini;
- si calcola il volume totale degli aggregati grossi;
- si calcola il volume totale del mastice di bitume (aggregati fini + bitume + micro-vuoti);
- si ricava per differenza il volume totale dei macro-vuoti;

- si trasforma la percentuale in peso di passante del fuso granulometrico in coppie di valori diametro-volume trattenuto, riferito ai soli aggregati a grana grossa.

A conclusione di tale procedimento si dispone di tutte le informazioni propedeutiche alla riproduzione del materiale multifase rispettando tutte le peculiarità che lo caratterizzano.

6.2.3 Processo di riproduzione di aggregati compatibili con il fuso granulometrico

Questa fase racchiude in sé una parte importante del cuore dell'algoritmo di modellazione di un provino multifase. I dati di input per il suo funzionamento sono la mesh, il fuso granulometrico ed eventuali parametri di forma degli aggregati. Preliminarmente alla definizione dell'algoritmo di generazione degli aggregati, è necessario definire le caratteristiche volumetriche degli aggregati da modellare.

I metodi presenti in letteratura di riproduzione dell'assortimento granulometrico adottano alcune approssimazioni, le quali non consentono di operare aprioristicamente una scelta statistica consapevole. Invero, si nota come nella quasi totalità dei casi sia solo una singola curva granulometrica ad assurgere quale riferimento del modello in luogo di un fuso granulometrico.

Sulla scorta delle coppie di valori diametro del crivello-percentuale di passante, infatti, una singola curva granulometrica impone delle restrizioni "puntuali" che vincolano il modello a passare attraverso i "nodi" della curva di riferimento. Contrariamente a quanto può sembrare ad una prima lettura, questa scelta non si pone come un controllo restrittivo, bensì realizza un vincolo lasco che consente al modello di mutare liberamente la dimensione degli aggregati entro il range delimitato dalle coppie di valori suddette. Ciò implica che eventuali forti disomogeneità dell'assortimento granulometrico risultino lecite all'interno dell'intervallo considerato. Un fuso granulometrico, invece, elimina tale inconveniente e pone dei limiti, inferiori e superiori, più stringenti e meglio governabili, che vincolano la curva del modello a risiedere all'interno di una regione. I vantaggi appena enunciati fanno prediligere l'utilizzo di un fuso granulometrico in luogo di una singola curva. Muovendosi all'interno del fuso, è

necessario distinguere due scenari che potrebbero potenzialmente realizzarsi: in presenza di una singola analisi qualsiasi percorso è ammissibile, anche se il più rappresentativo è costituito dalla linea media del fuso; se, viceversa, si conducesse un'analisi statistica su più provini è bene che essi rappresentino un campionamento di tipo gaussiano.

Dopo aver chiarito uno dei principali aspetti della metodologia proposta ed aver fatto una breve panoramica, riguardo l'utilità all'impiego di un fuso granulometrico, si può procedere con la rappresentazione dell'algoritmo. Una forte innovatività è innanzitutto conferita dalla flessibilità intrinseca del fuso granulometrico e dalla conseguente possibilità di accettare anche aggregati che, in una fase iniziale, non rispettino la curva granulometrica.

Scendendo maggiormente nel dettaglio, si inizia a descrivere il processo di riproduzione della mesostruttura del c.b. escludendo, solo momentaneamente, le modalità e i criteri di generazione del singolo aggregato.

L'algoritmo, che consente di ricostruire il provino numerico nel rispetto di un fuso granulometrico predeterminato, adotta una logica di "inseguimento" della curva granulometrica desiderata assolutamente innovativa. Infatti, come già in parte accennato, la creazione degli aggregati risiede all'interno del modello stesso e la curva granulometrica viene aggiornata costantemente (alla fine della generazione di ogni aggregato) durante tutto il processo di modellazione. Questa circostanza costituisce una importante diversità del presente approccio rispetto agli altri esistenti in letteratura, poiché, in quest'ultimi, gli aggregati vengono preventivamente ideati con forme geometriche e dimensioni ben definite e, solo successivamente, vengono collocati all'interno di un contenitore.

In Figura 6-9 si riporta la parte del diagramma di flusso dell'algoritmo relativa al solo inseguimento della curva granulometrica che, come si può già notare, contiene diversi controlli sia sulla curva sia sul fuso granulometrico.

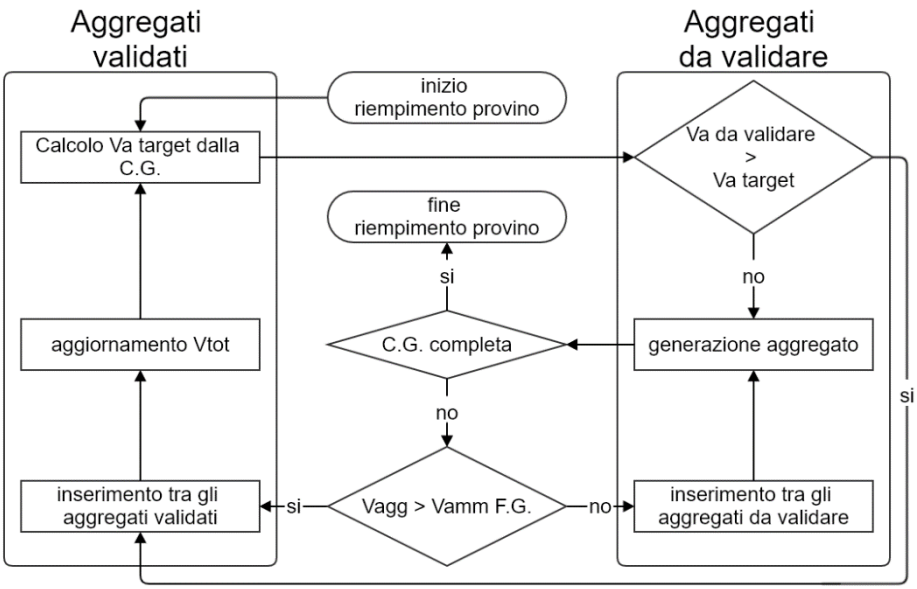


Figura 6-9 - Processo di inseguimento della curva granulometrica. (C.G.: curva granulometrica. F.G.: fuso granulometrico. Va: Volume dell'aggregato. Vamm: Volume ammissibile)

Il procedimento inizia col ricavare dalla curva granulometrica il diametro (ovvero, in modo equivalente, il volume) che l'algoritmo di creazione dell'aggregato si pone come obiettivo da raggiungere. Ovviamente, al fine di minimizzare i conflitti tra aggregati adiacenti, il provino viene riempito prima dagli aggregati di maggiori dimensioni e successivamente da quelli di dimensioni inferiori, circostanza che, tra l'altro, comporta anche una migliore efficienza e rispondenza alla realtà del modello. Come si può notare dalla stessa figura, l'algoritmo prevede l'esistenza di due gruppi di aggregati: "validati" e "da validare". Non vi sono differenze di alcun tipo tra i due gruppi di aggregati essendo semplicemente dei contenitori "virtuali" predisposti allo scopo di classificare temporaneamente gli aggregati durante la fase di generazione del provino.

L'unica differenza si riscontra solo per computo del volume *Vtot*, utile a valutare il diametro del successivo aggregato da modellare, nel quale ricadono unicamente gli aggregati già validati. Al completamento della generazione di ogni aggregato, viene deciso se questo, in funzione della dimensione ottenuta, debba ritenersi coerente o meno con il fuso granulometrico, ovvero se sia idoneo a far parte degli aggregati "validati" o, alternativamente, se sia di dimensioni non sufficienti da

renderlo (in quel momento) idoneo ad essere validato. In quest'ultimo caso, l'aggregato non è immediatamente scartato, viene bensì inserito tra quelli ancora "da validare". Detto in altri termini, l'aggregato che termina prematuramente la sua crescita è lasciato in stand-by per poi essere reinserito nel computo totale degli aggregati solo al momento opportuno.

Il volume *Vtot* è ottenuto, infatti, come somma dei volumi dei soli aggregati validati cosicché, se un aggregato verrà inserito nel gruppo degli aggregati da validare, risiederà in esso finché il suo diametro sarà superiore a quello ricavato entrando con *Vtot* nella curva granulometrica. La creazione degli aggregati continua iterativamente imponendo dei volumi obiettivo via via minori e tali da ricalcare la curva granulometrica desiderata. Non appena il volume totale degli aggregati generati raggiunge o supera il volume di calcolo degli aggregati a grana grossa il processo di generazione degli aggregati termina.

Tale criterio consente di riprodurre più fedelmente la curva granulometrica evitando di scartare l'aggregato che non è arrivato a maturazione e ripetendo la creazione di un altro aggregato.

Questo approccio costituisce inoltre una novità importante nel panorama letterario, anche grazie alla modalità innovativa di generazione dell'aggregato, trattata nel par. 6.2.4. Infatti, gli attuali metodi, di fronte alla presenza di conflitti che non consentono di collocare un aggregato di prefissate dimensioni, adottano un approccio *trial and error* che diminuisce drasticamente l'efficienza degli algoritmi. Tale algoritmo è, infatti, intrinsecamente stabile poiché fornisce in ogni caso una soluzione al problema e non contiene iterazioni che consentano allo stesso di divergere. Per tale motivo è necessario calibrare opportunamente alcuni parametri quali: la dimensione degli elementi finiti o il diametro che discrimina aggregati grossi e fini e ciò al fine di ottenere risultati ottimali dal modello.

Si noti bene che la logica che sta a fondamento dell'algoritmo appena esposto può essere teoricamente impiegata anche negli attuali modelli in letteratura (adottando, ovviamente, le opportune modifiche), con un potenziale beneficio sia in termini di qualità sia di velocità nella generazione di provini numerici.

6.2.4 Modalità di generazione dell'aggregato e criteri d'ingrandimento

In abbinamento alla processo di inseguimento della curva granulometrica appena descritta è necessario introdurre anche il processo di generazione di un singolo aggregato. Un'illustrazione a grandi linee dell'intero processo di generazione degli aggregati è mostrata in Figura 6-10, mettendo stavolta a fuoco la parte relativa alla generazione del singolo aggregato. Dal diagramma di flusso ivi rappresentato si può notare come ogni aggregato sia il risultato di un percorso ciclico, denominato *growing process*.

In prima analisi, tale procedura potrebbe essere considerata semplice poiché appare come un'iterazione composta alternativamente dall'accrescimento dell'aggregato e dalla verifica che lo stesso possa ingrandirsi ancora ma, come si vedrà nel seguito, risulta piuttosto articolata, tanto nella modalità di crescita quanto nei criteri che consentono la crescita stessa.

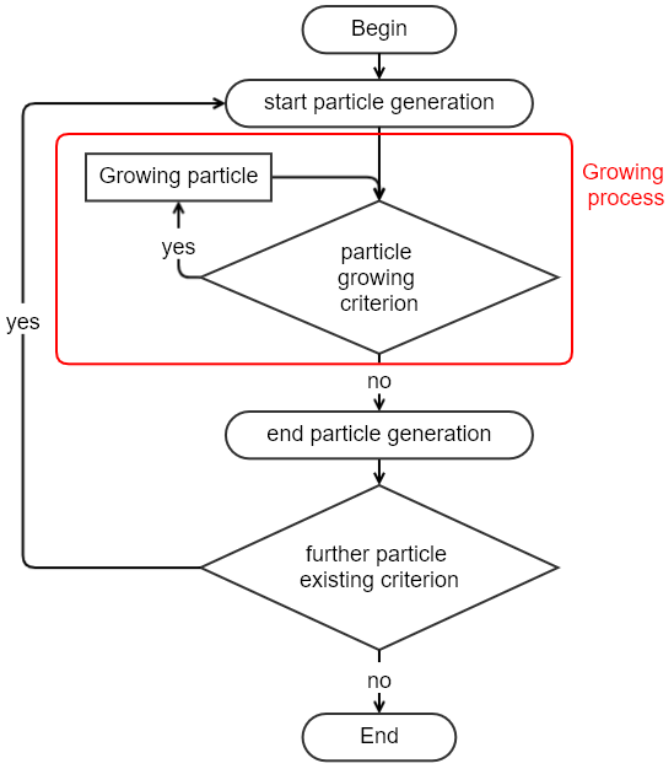


Figura 6-10 - Diagramma di flusso dell'algoritmo di generazione degli aggregati

La prima operazione della presente procedura, già in parte accennata nel par. 6.2.3, consiste nell'esaminare il fuso granulometrico di Figura 6-8. Entrando nel grafico con il volume totale V degli aggregati a grana grossa già realizzati (ovvero per la prima iterazione V=0), si estrae il valore del diametro corrispondente.

Il raggiungimento di tale valore costituisce l'obiettivo primario del *particle growing criterion*, al cui interno coesistono altri criteri di crescita degli aggregati come, ad esempio, il rispetto di fattori di forma prefissati. Successivamente inizia il *growing process*, ovvero un insieme di operazioni volte ad ingrandire un singolo aggregato che, alternandosi con il *particle growing criterion*, porta l'aggregato alla maturazione desiderata.

Tale processo normalmente termina quando l'aggregato raggiunge la maturazione desiderata in termini dimensionali (diametro desiderato o, similarmente, volume desiderato), ma la citata circostanza si verifica anche quando l'aggregato trova qualche ostacolo durante il suo processo di ingrandimento (circostanza estremamente frequente).

Occorre sottolineare come, tuttavia, non sempre il processo culmina con tale fisiologico epilogo. Potrebbe ad esempio verificarsi anche un'altra eventualità di cui è necessario tenere conto, ovvero che i vincoli circostanti l'aggregato (es. contorno del provino, presenza di altri aggregati preventivamente generati, ecc.) siano incompatibili con la modalità desiderata di ingrandimento dell'aggregato e tali da impedire allo stesso di crescere ulteriormente. Tale evenienza si spiega facilmente richiamando quelle condizioni di forma che, come già sopra esposto, generano una circostanza che non permette di ingrandire ulteriormente l'aggregato realizzando così il superamento di rapporti di forma prefissati che, come presupposto nei criteri di crescita insiti nell'algoritmo, interrompe prematuramente il processo di generazione. In tal caso, ricollegandosi a quanto riportato nel par. 6.2.3, l'iterazione non arriva alla sua naturale conclusione e l'aggregato rientrerà nel gruppo di aggregati "da validare".

Struttura dei dati alla base dell'algoritmo

Come già anticipato nel par. 5.5, per il corretto funzionamento dell'algoritmo proposto sono necessarie alcune operazioni

propedeutiche che consentano una rapida e speditiva interpretazione delle informazioni che il modello stesso è in grado di restituire durante la fase di generazione degli aggregati. A tal fine sono state predisposte le seguenti codifiche che consentono di determinare correttamente lo stato di ogni entità della mesh durante tutto il processo di generazione del provino.

Stato degli elementi finiti (*m.t_type, m.p_tObj, m.f_tObj)*

- +n = assegnato all'aggregato n-esimo.
- 0 = assegnazione impossibile (presente sono per esigenze di calcolo ad es. *p_t* nelle colonne inutilizzate per assenza di elementi collegati oppure la seconda colonna *f_t* per le facce sul contorno del modello).
- -1 = non assegnato.
- -2 = assegnato al mastice.
- -3 = assegnato ai vuoti.

Stato di una faccia (m.f_state)

- 9 = libero e sul confine
- 8 = occupato sul confine
- 2 = libero da entrambi i lati
- 1 = libero dall'altro lato
- 0 = occupato da entrambi i lati

Il vettore *m.p_num_tfree* contiene per ogni nodo il numero di tetraedri collegati con stato "non assegnato". Tutte queste informazioni, sia per i tetraedri che per le facce della mesh, sono contenute nelle variabili *m.t_type m.p_tObj m.f_tObj m.p_num_tfree m.f_state* che vengono aggiornate ad ogni cambiamento del modello.

Operazione di "growing particle"

Essendo una mesh composta da elementi finiti, in una fase iniziale dello studio si è pensato di far corrispondere ad ogni iterazione un aumento dell'aggregato di un elemento finito e, pertanto, il procedimento era stato incentrato sulla base dei soli elementi finiti e delle relative adiacenze. I primi risultati sembravano però insoddisfacenti poiché mostravano superfici molto frastagliate e non realistiche oltre che difficilmente controllabili. Ricercando pertanto

una soluzione alternativa che migliorasse la superficie modellata, è stata escogitata una modalità di ingrandimento che non avesse più come base il singolo tetraedro ma gruppi di tetraedri afferenti ad un nodo.

Alla prima iterazione viene scelto un vertice tra i nodi della mesh in cui nessuno degli elementi finiti attorno ad esso sia stato già assegnato, ovvero sia stato attribuito ad un generico aggregato od all'asphalt mastic (confrontando *m.p_num_tfree* con *p_num_t*).

Inizia a questo punto un processo di accrescimento dell'aggregato che si compone delle seguenti operazioni:

- si esamina la porzione libera delle facce sul contorno dell'aggregato (ovvero le zone occupate dagli elementi finiti adiacenti all'aggregato che non hanno ancora ricevuto un'assegnazione) in modo tale da individuare le zone libere verso le quali l'aggregato può estendersi;
- si sceglie un elemento finito adiacente ad una delle facce libere sul contorno dell'aggregato secondo un criterio che può dipendere dalla forma dell'aggregato ovvero dai controlli di convessità ed orientamento;
- si estende l'attributo di "aggregato" all'elemento scelto e si apportano le modifiche al set di tabelle e variabili che contengono le informazioni di stato sulle entità topologiche del modello;

Criteri di crescita dell'aggregato

Preliminarmente alla valutazione della possibilità che ha un aggregato di crescere o meno è necessario aggiornare o ricalcolare le proprietà dell'aggregato stesso: il volume, la superficie, il d_{min}, il d_{max}, la direzione di d_{min}, la direzione di d_{max} ed il rapporto di forma. I criteri di crescita attualmente implementati nel modello sono i seguenti:

- Volume. Ad ogni iterazione viene verificato se sia stato raggiunto o meno il volume desiderato per l'aggregato in fase di creazione.
- Sfericità. Ad ogni iterazione viene verificato se la sfericità rientra entro valori prefissati in funzione del volume dell'aggregato già realizzato e della dimensione caratteristica degli elementi finiti.
- Forma. Come precedentemente accennato, la metodologia qui presentata prevede la creazione di aggregati di forma sferica.

Il criterio attualmente utilizzato per l'ingrandimento dell'aggregato genera forme tendenti alla sfera. Per determinare l'elemento finito verso il quale l'aggregato deve espandersi, l'algoritmo valuta la distanza di tutti i punti esterni dell'aggregato stesso dal suo baricentro e, ad ogni iterazione, sceglie quel punto che si trova alla distanza minore dal baricentro secondo quanto di seguito riportato.

```
VectOuterPoints=f.p(a.outerpoints,:)-a.baricentro
DistOuterPoints=sum(VectOuterPoints.^2,2)
[~,I]=sort(DistOuterPoints)
point=a.outerpoints(I(1))
```

Dove *a.outerpoints* sono le coordinate dei punti appartenenti alla superficie esterna dell'aggregato, *a.baricentro* sono le coordinate del baricentro dell'aggregato, *VectOuterPoints* sono i vettori congiungenti il baricentro ai punti sulla superficie esterna e *DistOuterPoints* sono le relative distanze al quadrato.

Per consentire all'algoritmo di simulare forme più generiche e che si allontanino da quelle sferica si potrebbero adottare diverse soluzioni già proposte in letteratura, le quali si differenziano o per generazione casuale di forme geometriche convesse o per la riproduzione di aggregati rilevati sperimentalmente. Un'interessante opportunità di studio in tal senso può essere basata sugli studi condotti da Qian, Z. et al. [44] i quali rilevano, direttamente o statisticamente, la forma degli aggregati da particelle reali e utilizzano le armoniche sferiche per descrivere la forma irregolare della particella tramite un insieme di coefficienti armonici sferici.

Inoltre, potrebbe essere interessante definire anche altri parametri per le caratteristiche degli aggregati, in termini di convessità e fattori di forma, da porre in considerazione in fase di analisi.

6.2.5 Modellazione del mastice di bitume

Per la generazione del mastice di bitume sono state finora contemplate due modalità: la prima consiste nel generare il mastice di bitume parallelamente alla creazione degli aggregati; la seconda rimanda questa operazione solo dopo che tutti gli aggregati siano stati modellati.

Nel primo caso, non appena un aggregato viene ultimato (prematuramente o naturalmente che sia) viene rivestito immediatamente dopo del mastice di bitume. Questo rivestimento è realizzato assegnando l'attributo di mastice di bitume a tutti gli elementi finiti che condividono delle facce con la superficie dell'aggregato. Tale operazione fa sì che lo spessore del mastice tra un aggregato e l'altro abbia una dimensione minima non inferiore alla dimensione caratteristica degli elementi finiti, il che comporta inevitabilmente una limitazione intrinseca nel modello dovuta all'impossibilità di contatto tra aggregati.

Nel secondo caso, al contrario, il mastice di bitume viene modellato in una fase successiva alla generazione di tutti gli aggregati. Ciò consente di superare l'anzidetta limitazione ponendo stavolta gli aggregati a diretto contatto.

Questa procedura contempla due fasi nelle quali gli aggregati sono "avvolti" iterativamente dal mastice di bitume: nella prima l'algoritmo assegna l'attributo di mastice di bitume a tutti gli elementi finiti che condividono una faccia con la superfice esterna dell'aggregato; nella seconda, invece, l'assegnazione è fatta a tutti gli elementi finiti che condividono un nodo con la superfice esterna dell'aggregato.

Queste assegnazioni vengono fatte in due cicli, partendo prima dall'aggregato più piccolo per concludere con il più grande per la prima fase e ripetendo l'iterazione per la seconda.

6.2.6 Modellazione del film di bitume

Aggregati e mastice di bitume, ovvero le due fasi tradizionalmente contemplate in letteratura per la modellazione del c.b., sono frutto di un approccio basato su un'ipotesi per la quale gli aggregati tra loro vicini non abbiano mai delle zone di contatto e siano pertanto dispersi in una matrice bituminosa. Tale ipotesi, per quanto poco realistica, ad onor del vero, si potrebbe presumibilmente verificare nel caso in cui coesistano contemporaneamente due circostanze: un sovradosaggio di legante ed una scarsa, o quasi assente, compattazione. Solo in quest'ultimo caso, infatti, il c.b. non raggiungerebbe il desiderato addensamento tra aggregati che avrebbe conferito allo stesso una robusta struttura lapidea, idonea a sopportare i carici da traffico. Da

quanto appena esposto si comprende bene l'utilità di avere un'adeguata modellazione dei contatti intergranulari, realmente presenti nella miscela.

Per quanto concerne il suddetto aspetto, il processo di modellazione degli aggregati, esposto nel par. 6.2.4, realizza un'appropriata modellazione degli aggregati, i quali, in funzione del loro numero e della loro granulometria, possono trovarsi in situazioni in cui si generano effettivamente alcune zone di contatto. Queste zone possono essere identificate come le superfici per le quali gli elementi finiti ad esse adiacenti appartengono tutti, da un lato, ad un aggregato e, dal lato opposto, ad un altro aggregato. Il modello, così come fino ora elaborato, necessita quindi di un ulteriore passaggio volto a disconnettere fisicamente gli aggregati adiacenti poiché, se così non fosse, quest'ultimi sarebbero modellati come un unico aggregato, dal momento che la loro zona di contatto condivide gli stessi nodi della mesh.

Ricollegandosi al titolo del presente paragrafo, il principale scopo della modellazione del film di bitume è, quindi, quello di modificare la struttura della mesh in modo tale consentire gli spostamenti relativi tra le molteplici facce a contatto degli aggregati adiacenti. A tale scopo è stata implementata una procedura volta all'inserimento di elementi finiti di spessore nullo interposti tra gli elementi finiti a contatto che appartengono a due differenti aggregati. In particolare la tipologia degli elementi finiti aggiunti al modello è wedge a sei nodi, come rappresentato in Figura 6-11, denominati anche elementi coesivi per le particolari proprietà meccaniche che vi si possono attribuire.

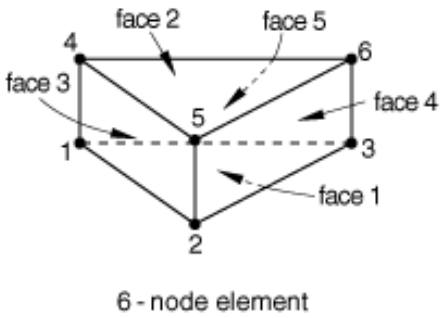


Figura 6-11 – Elemento di Abaqus C3D6

La presente procedura utilizza il programma DEIP elaborato da T.J. Truster [43] e, per ulteriori dettagli, si rinvia al par. 5.7.2.

Come già implicitamente accennato, la disconnessione di aggregati adiacenti non è l'unico motivo per il quale adoperare il film di bitume poiché esistono molteplici scopi che rendono utile la sua implementazione. Infatti, una tra le più utilizzate tecniche per la modellazione dei fenomeni fessurativi adopera proprio gli elementi coesivi per la creazione di una CZM, come in parte esposto al par. 5.6.2.

Riguardo alla modellazione del caso di specie, sono stati rivestiti di elementi coesivi tutte le superfici esterne degli aggregati e non solo le zone di contatto poiché, oltre a realizzare una rappresentazione più attinente alla realtà, le zone al confine della superfice di contatto avrebbero richiesto, per questioni di compatibilità della mesh, tipologie diverse di elementi finiti con un'inutile complicazione del problema.

Riassumendo, sono state individuate due modalità di inserimento del film di bitume: esclusivamente attorno agli aggregati (indispensabile per modellare correttamente i contatti intergranulari) o, in aggiunta, attorno ad ogni elemento del mastice di bitume (modellazione utile per studiare i fenomeni fessurativi).

6.2.7 Modellazione dei vuoti

La quarta ed ultima macro-fase, riguardante la generazione **dei vuoti**, può essere così brevemente illustrata.

A seguito della modellazione degli aggregati grossi, si ottiene una condizione nella quale il mastice bituminoso (modellato come unica fase composta da aggregati fini + bitume + microvuoti) avvolge tutti gli aggregati. Il compito dell'algoritmo è colmare gradualmente il vuoto rimanente tra gli spazi intergranulari finché non sono rispettate le caratteristiche fisiche del provino imposte inizialmente in termini di percentuale di bitume. Si procede quindi per iterazioni successive, aumentando la quantità di mastice di bitume attorno agli aggregati fino al raggiungimento della percentuale desiderata del volume dei vuoti.

6.3 Scalabilità del modello

Le tre fasi che compongono il mastice di bitume (aggregati fini, bitume e microvuoti) possiedono alcune analogie con gli altrettanti elementi modellati per il conglomerato bituminoso (aggregati grossi, mastice di bitume e vuoti), come mostrato in Figura 6-12, sia ovviamente per la composizione che per la distribuzione delle fasi nella miscela. È anche opportuno evidenziare come vi siano alcune differenze sostanziali tra le suddette fasi quali, prima tra tutte la loro diversa concentrazione. Infatti la percentuale in peso di bitume nel conglomerato si attesta su valori intorno al 4-6%, mentre, per il mastice di bitume, questa sale al 60%.

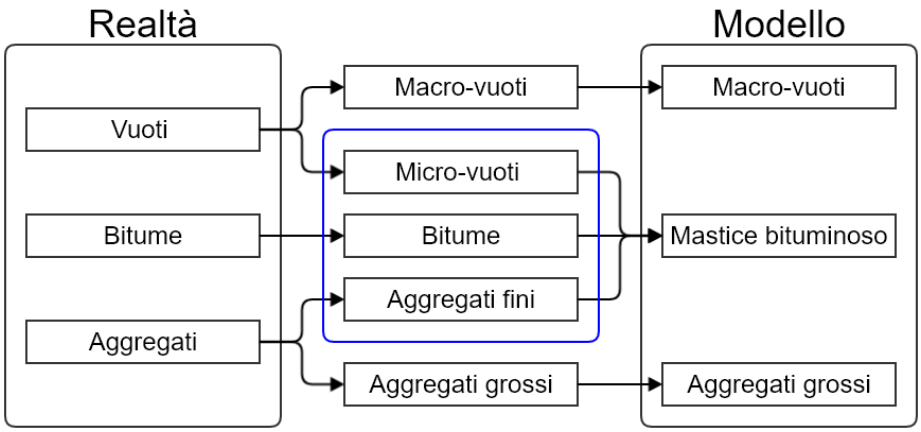


Figura 6-12 - Approssimazioni del modello

Quanto finora esposto per il conglomerato bituminoso considera come informazione nota il comportamento del mastice di bitume, quando in realtà quest'ultimo materiale possiede le stesse incertezze e variabilità del primo. Da tale considerazione nasce l'intuizione e l'opportunità di adottare la stessa tecnica di modellazione del c.b. per il mastice di bitume così da poter produrre modelli costitutivi opportunamente calibrati a micro-scala da utilizzare in una scala di rappresentazione superiore. Infatti, in piena analogia con quanto già discusso per il c.b., la fase solida potrebbe essere a sua volta suddivisa in aggregati fini e filler per riadottare le stesse ipotesi già presentate per la modellazione multifase. Dal punto di vista meccanico, il comportamento a compressione dei due materiali è completamente

diverso poiché nel c.b. gli aggregati creano una struttura rigida a compressione e, quindi, il modulo di elasticità della miscela tende ad avvicinarsi maggiormente a quello degli aggregati, mentre il mastice di bitume segue la reologia del bitume, quale fase prevalente nella miscela. Nel mastice di bitume, infatti, gli aggregati si presentano in una percentuale minore ed hanno prevalentemente una funzione di irrigidimento della miscela.

7 Simulazioni

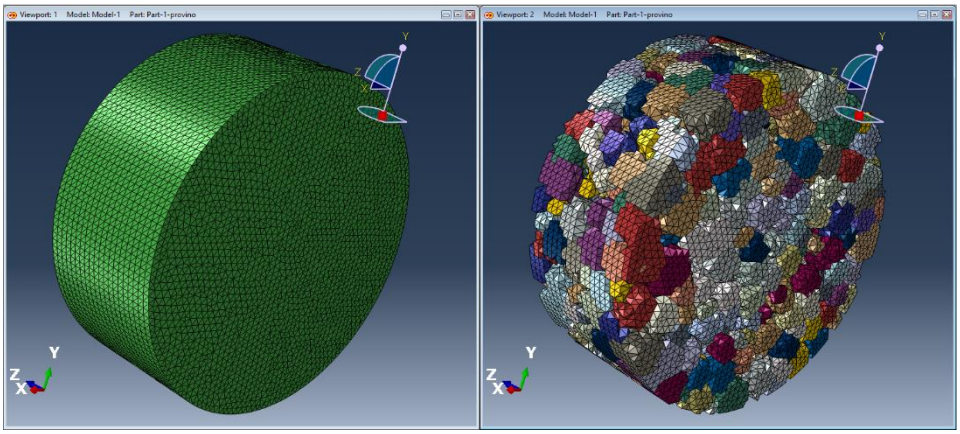
Dopo aver ampiamente descritto la metodologia innovativa volta alla modellazione del conglomerato bituminoso a livello di mesoscala, in questo capitolo si rappresentano talune applicazioni rese al fine di osservare il comportamento e la validità del modello proposto. Come si avrà modo di vedere a breve, per raggiungere il suddetto scopo si è reso necessario condurre molteplici simulazioni numeriche del modello tridimensionale della miscela bituminosa.

Le analisi svolte perseguono il duplice scopo di riprodurre numericamente il comportamento della miscela e di studiarlo al variare di tutti quei parametri che possano avere una notevole rilevanza nella valutazione della rigidezza e della resistenza meccanica del materiale multifase. Il punto di forza dell'approccio proposto è rappresentato dalla possibilità di introdurre nell'analisi alcune variabili finora inesplorate dalla maggior parte degli studiosi, come la densità dei contatti intergranulari, la forma degli aggregati e la percentuale dei vuoti. Le ragioni di questa circostanza trovano la loro giustificazione tanto sul piano sperimentale quanto su quello teorico: dal punto di vista empirico, infatti, basta pensare alle difficoltà di misura che impediscono un'accurata valutazione dei suddetti parametri; dal punto di vista teorico, gioca un ruolo fondamentale la carenza di approcci numerici particolareggiati che, per converso, consentirebbero la formulazione di modelli maggiormente attinenti alla realtà.

7.1 Generazione di un provino di forma cilindrica

Nel presente paragrafo sono esposti sinteticamente i risultati ottenuti dall'algoritmo di packing riproducendo un provino cilindrico in 3D con diametro e spessore rispettivamente di 100 mm e 40 mm, come mostrato in Figura 7-1a. Il numero totale di elementi finiti generati è 703658 con 122848 nodi e una dimensione massima del singolo elemento finito di 1.5 mm. Il tempo totale richiesto per l'intero processo di generazione è di circa 5 minuti (con l'uso di un normale laptop), dove circa una decina di secondi è impiegata per la

generazione della mesh e la parte restante del tempo è dedicata all'assegnazione degli aggregati e del mastice di bitume.



a) *b)*

Figura 7-1 – a) Mesh di partenza per la generazione del provino; b) risultato di assegnazione degli aggregati.

Della miscela bituminosa sono state modellate le tre fasi: aggregati grossi, mastice di bitume e vuoti. Il valore di cut-off scelto per discriminare aggregati grossi da aggregati fini è di 3 mm ed il contenuto di bitume è il 5% in peso sugli aggregati. La generazione degli aggregati ha come obiettivo quello di adattarsi alla curva di distribuzione granulometrica rappresentata con una linea continua in Figura 7-2 e, come confermato dai punti asteriscati che rappresentano gli aggregati nella stessa figura, si può notare come l'algoritmo segua perfettamente la curva obiettivo.

La successiva generazione del mastice di bitume ha termine non appena viene raggiunta la percentuale dei vuoti desiderata, in questo caso il 5%.

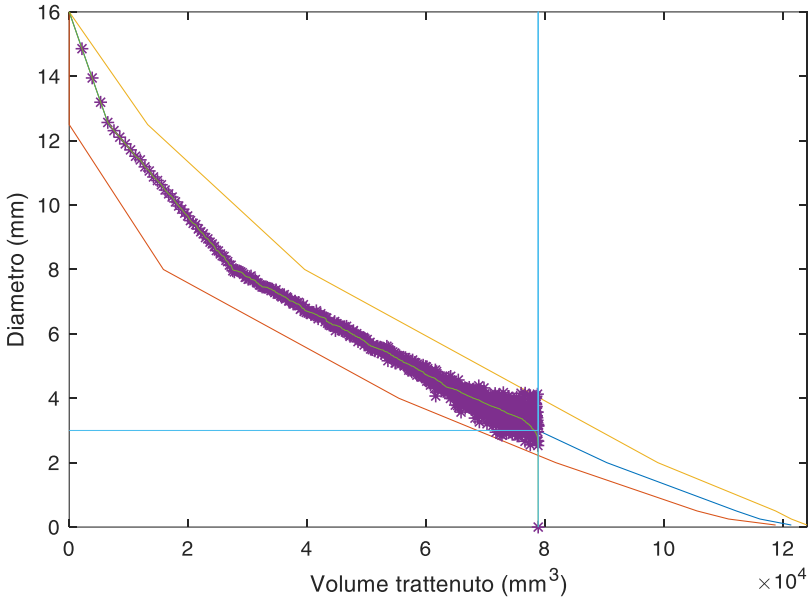


Figura 7-2 – Curva granulometrica espressa in termini di volume del trattenuto

La Figura 7-3 rappresenta la composizione finale della miscela in cui si ricorda che la percentuale relativa al mastice di bitume è il risultato della somma di aggregati fini e bitume.

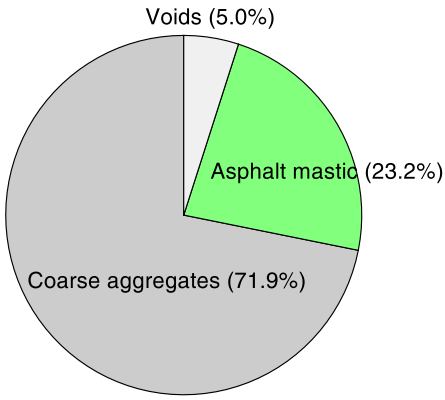
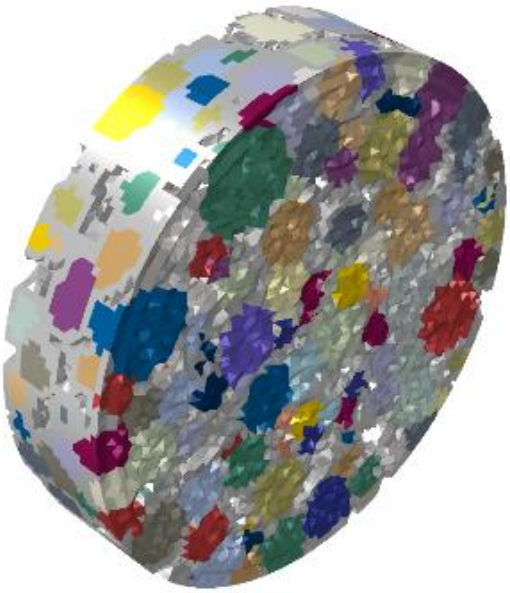


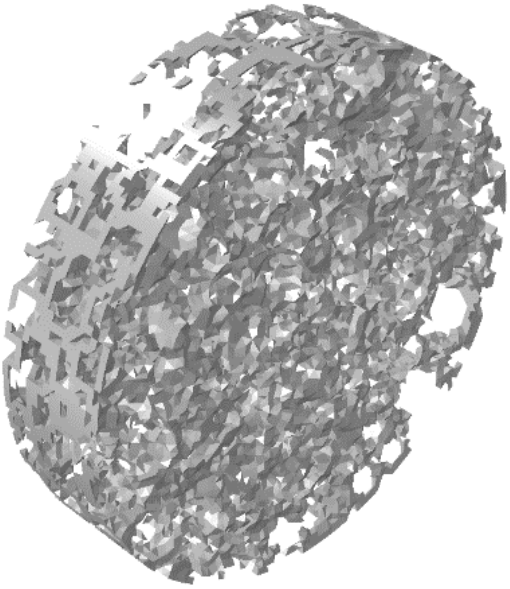
Figura 7-3 – Composizione volumetrica finale della miscela.

Da questo primo modello, mostrato nella Figura 7-4, si nota come l'effetto di ingranamento tra gli inerti è riprodotto efficacemente con aggregati che condividono tra loro piccole superfici. Inoltre, rispetto ai

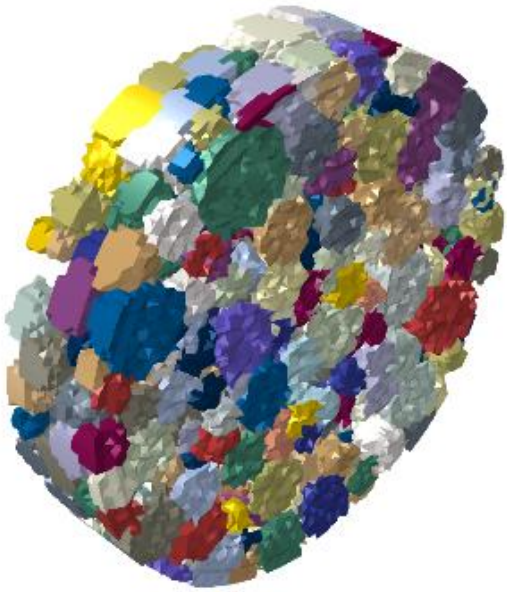
modelli presenti in letteratura, il contatto intergranulare è presente con importanza pari a quella degli aggregati o del mastice di bitume.



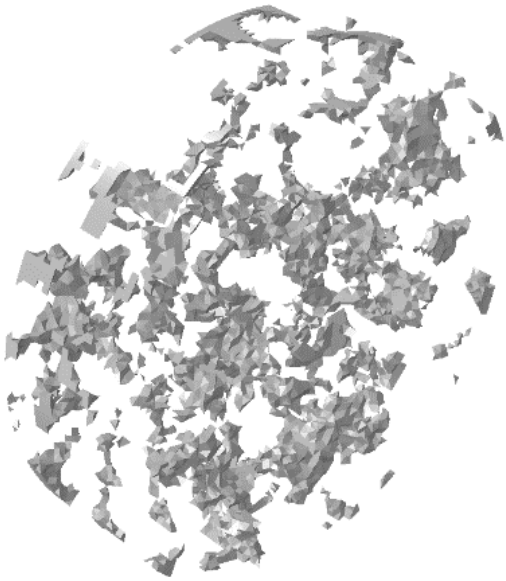
a)



b)



c)



d)

Figura 7-4 – Risultato della simulazione un c.b dove sono mostrate del diverse fasi in una sezione di un provino cilindrico: a) aggregati e mastice bituminoso; b) mastice bituminoso; c) aggregati; d) vuoti (5%).

Per fornire un'ulteriore dettaglio sul comportamento dell'algoritmo, si riporta un esempio di due aggregati posti a contatto tra loro. Esaminando la Figura 7 5 si riscontra che la superficie di

contatto evidenziata in rosso è sufficientemente estesa in proporzione alla dimensione stessa degli aggregati. Questo è dovuto principalmente all'algoritmo di ingrandimento degli aggregati che, al momento della generazione del secondo aggregato, tende al raggiungimento delle forma sferica senza contemplare, almeno allo stato attuale, un avanzamento preferenziale della direzione in cui si ha libertà di crescita.

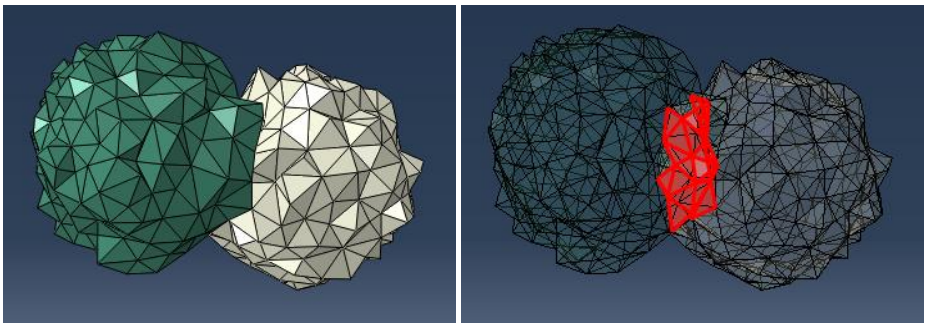


Figura 7-5 - Esempio di contatto intergranulare

Altre interessanti considerazioni possono essere fatte nei confronti dell'algoritmo di ricoprimento degli aggregati. Come già rappresentato nel precedente capitolo, successivamente alla creazione degli aggregati l'algoritmo valuta sulla superfice esterna degli stessi quali siano gli elementi finiti non ancora assegnati ed attribuisce ad essi le proprietà del mastice di bitume.

In Figura 7-6 è rappresentato un aggregato prima e dopo la fase di ricoprimento. Da tale figura si evince che il mastice di bitume ricopre completamente l'aggregato ad eccezione della zona che si trova al confine del modello che, per ovvi motivi, rimane scoperta.

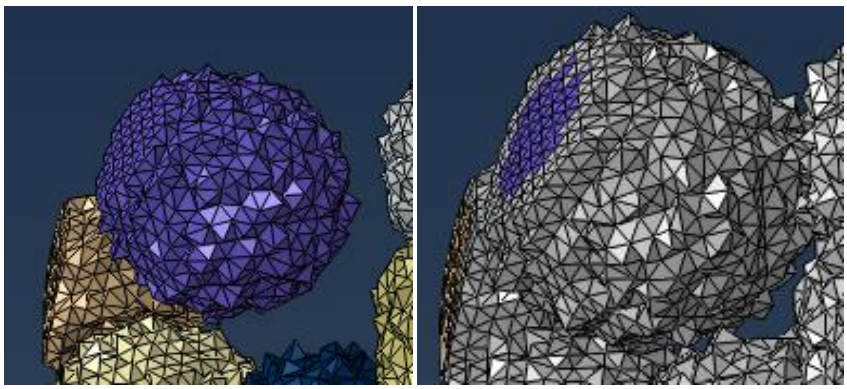


Figura 7-6 - a) Aggregato nudo; b) Aggregato ricoperto dal mastice

Riguardo alla superficie esterna degli aggregati, con riferimento non alla forma complessiva bensì alla tessitura della superfice stessa, esistono certamente alcuni aspetti della ricerca che consentono ulteriori sviluppi e perfezionamenti. Se da un lato, infatti, aggregati di forme precostituite come quella sferica o ellissoidica costituiscono un'eccessiva distorsione della realtà, dall'altro, l'approccio proposto, che utilizza invece una mesh precostituita, realizza una superficie esterna frastagliata. A tal proposito è stata implementata una procedura per identificare le zone in cui la superfice presenta accentuate convessità o concavità. In particolare, ciò che si valuta rispetto ad ogni vertice della superficie è l'angolo solido formato dalla superfice stessa ed ottenuto come somma degli angoli solidi generati dai tetraedri dell'aggregato che afferiscono a quel vertice. A titolo esemplificativo, in Figura 7-7 sono mostrate due rappresentazioni dello stesso aggregato nelle quali, in una, sono evidenziati i gruppi di tetraedri eccessivamente spigolosi e, nell'altra, questi tetraedri sono stati rimossi.

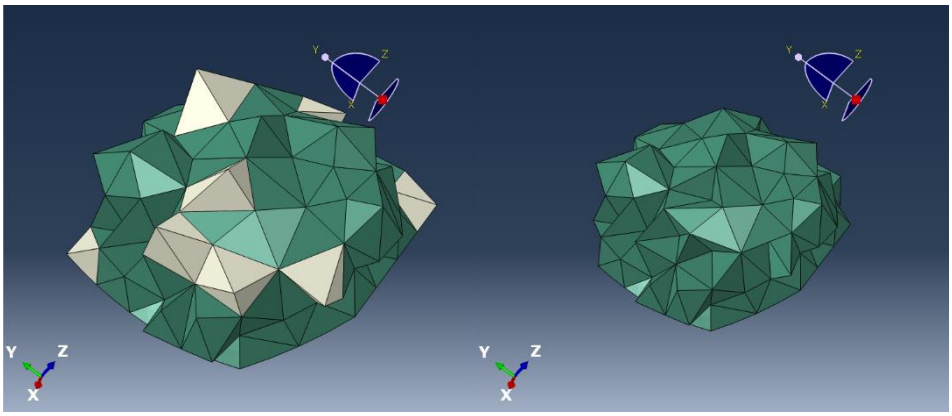


Figura 7-7 - controllo degli angoli solidi sulla superficie esterna

Procedendo in tal senso, sia per addizione dei tetraedri all'aggregato nel caso di superficie eccessivamente concava, sia nel caso di sottrazione degli stessi nel caso opposto di superficie ad ogni vertice della superficie esterna dell'aggregato.

7.2 Test di compressione diametrale

L'Obiettivo dello studio è sottoporre il provino di conglomerato bituminoso ad un test Indirect Tensile Stiffness Modulus *ITSM* (Figura 7-8) mediante simulazione ad elementi finiti. La prova è stata schematizzata ponendo un provino di spessore 20 mm e diametro 100 mm su due piastre schematizzate come superfici vincolate, una inferiore e l'altra superiore, la prima con condizioni di incastro e la seconda libera di muoversi solo in direzione verticale. Dette superfici, di forma uguale ad una porzione della superficie laterale del provino, sono legate allo stesso tramite un vincolo Costraint di tipo Tie.

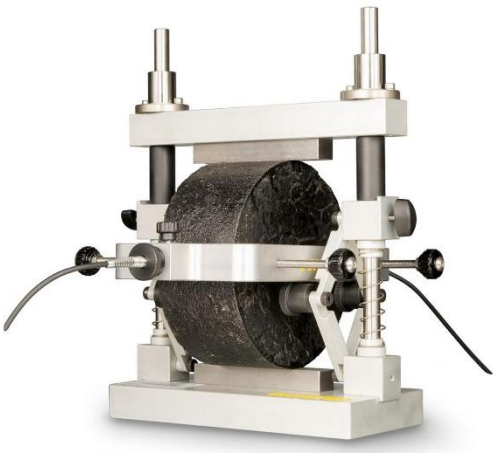


Figura 7-8 - ITSM test[7]

I modelli costitutivi delle diverse fasi sono di tipo elastico-lineare con modulo degli aggregati un ordine di grandezza superiore a quello del mastice di bitume. Si precisa inoltre che la modellazione del provino, pur generando la presenza dei vuoti intergranulari, allo stato attuale non contempla l'eliminazione degli elementi finiti associati ai vuoti, bensì attribuisce loro proprietà meccaniche di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quelle del mastice di bitume, proprio per renderne trascurabile il contributo di resistenza.

La simulazione consiste nel comprimere il provino tramite un abbassamento imposto alla piastra superiore per visualizzare la

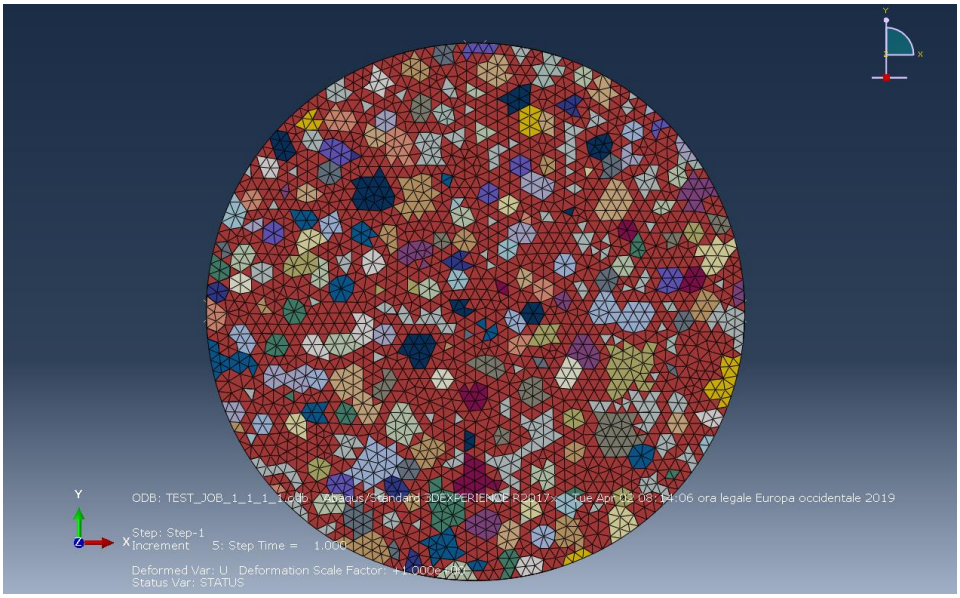
[7] MATEST Indirect Tensile Modulus (IDTM) http://www.matest.com/it/prodotto/b250-kit-indirect-tensile-modulus-(idtm)

distribuzione delle tensioni e delle deformazioni all'interno del provino di conglomerato bituminoso.

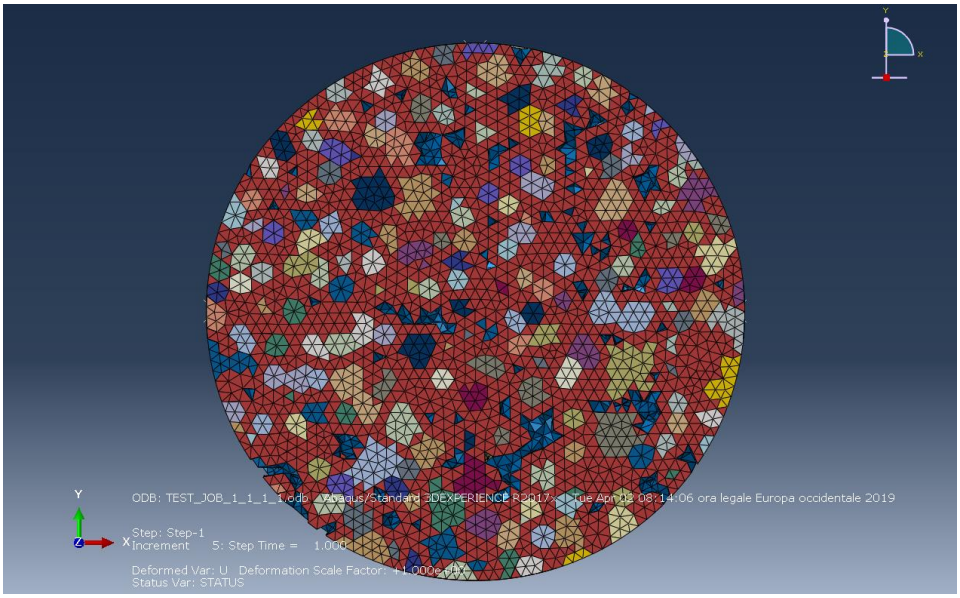
Nelle figure seguenti è possibile osservare:

a) superficie esterna del provino con colorazione diversa tra gli aggregati;
b) superficie esterna del provino con colorazione diversa tra gli aggregati nella quale sono stati esclusi dalla visibilità i vuoti intergranulari;
c) aggregati con il rivestimento del film di bitume;
d) aggregati nudi;
e) vuoti intergranulari
f) risultato della simulazione con visualizzazione di solo i primi dieci aggregati in ordine di dimensione;
g) stato deformativo del provino a seguito dell'applicazione del carico;
h) stato tensionale del provino a seguito dell'applicazione del carico.

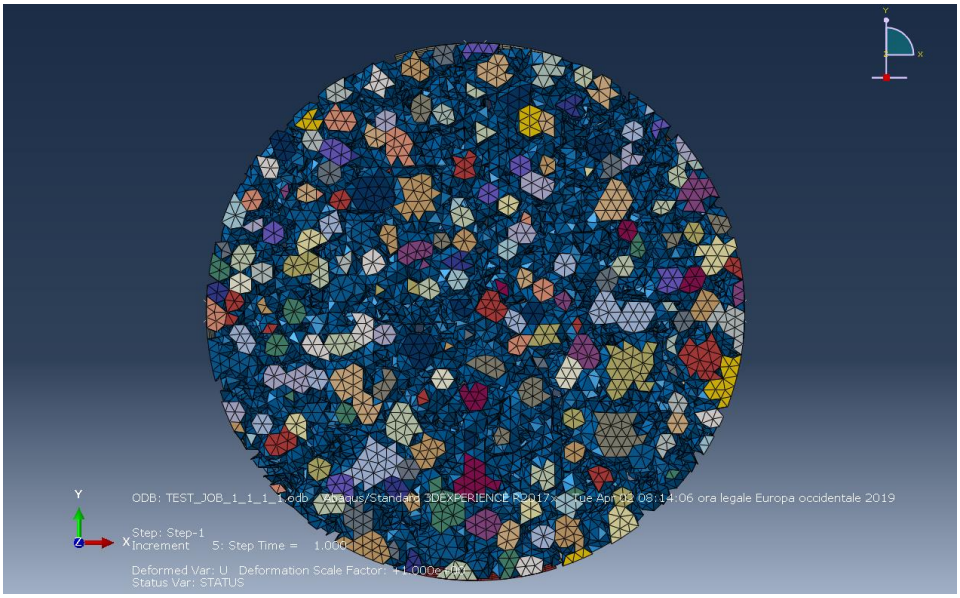
Come si può notare dalle ultime due figure l'andamento delle tensioni nel provino ha una distribuzione molto irregolare che segue le potenziali superfici di rottura.


Y
X
Z
ODB: TEST_JOB_1_1_1_1.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2017x Tue Apr 02 08:14:06 ora legale Europa occidentale 2019
Step: Step-1
Increment 5: Step Time = 1.000
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00
Status Var: STATUS

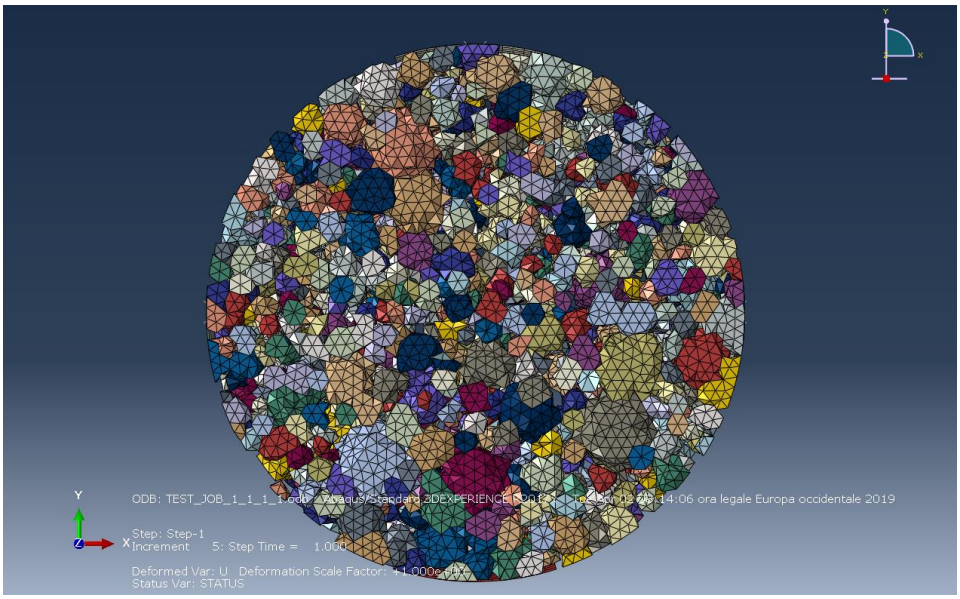
a


Y
X
Z
ODB: TEST_JOB_1_1_1_1.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2017x Tue Apr 02 08:14:06 ora legale Europa occidentale 2019
Step: Step-1
Increment 5: Step Time = 1.000
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00
Status Var: STATUS

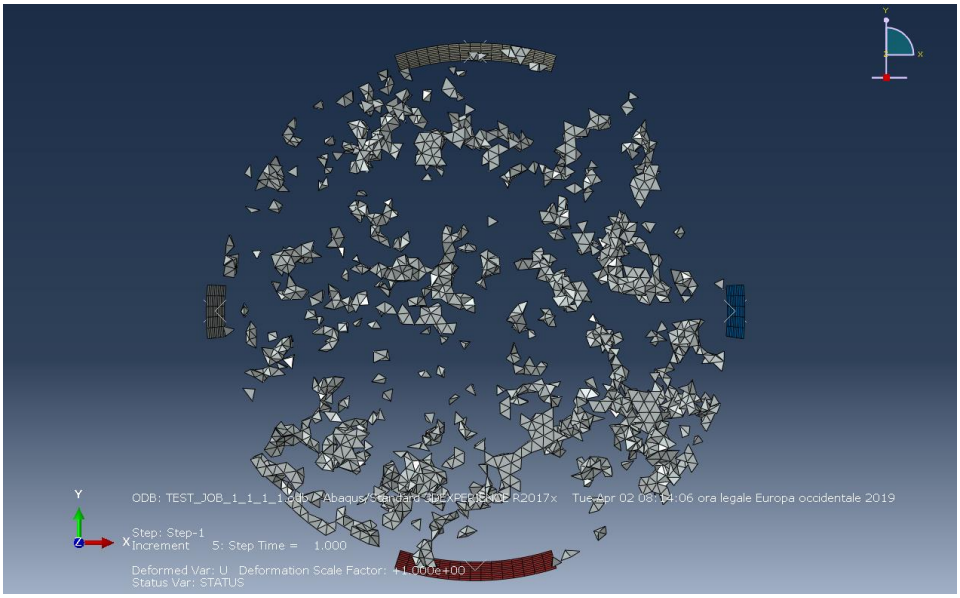
b


ODB: TEST_JOB_1_1_1_1.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2017x Tue April 2 08:14:06 ora legale Europa occidentale 2019
Step: Step-1
Increment 5: Step Time = 1.000
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+01
Status Var: STATUS

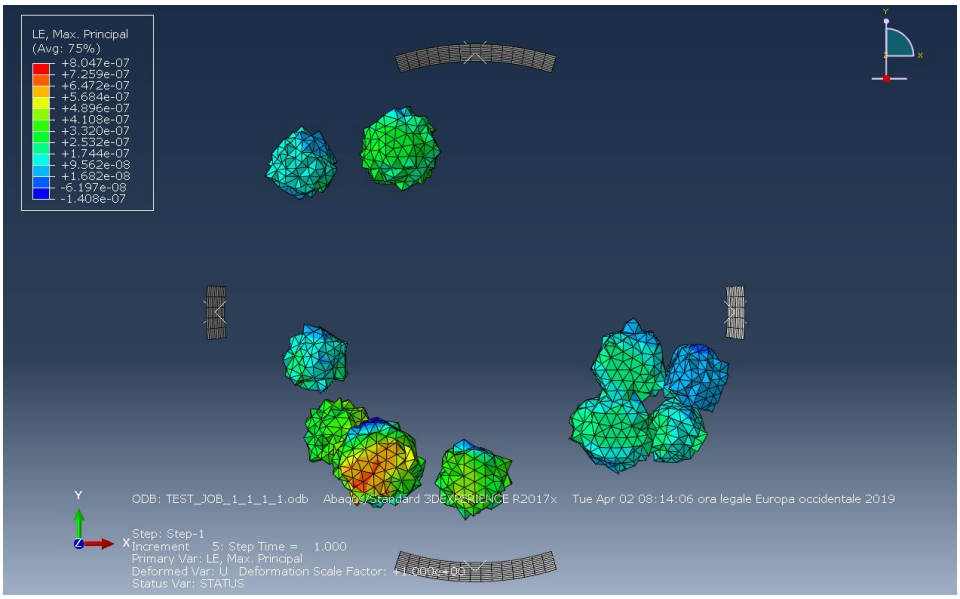
c


ODB: TEST_JOB_1_1_1_1.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2017x Tue April 2 08:14:06 ora legale Europa occidentale 2019
Step: Step-1
Increment 5: Step Time = 1.000
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+01
Status Var: STATUS

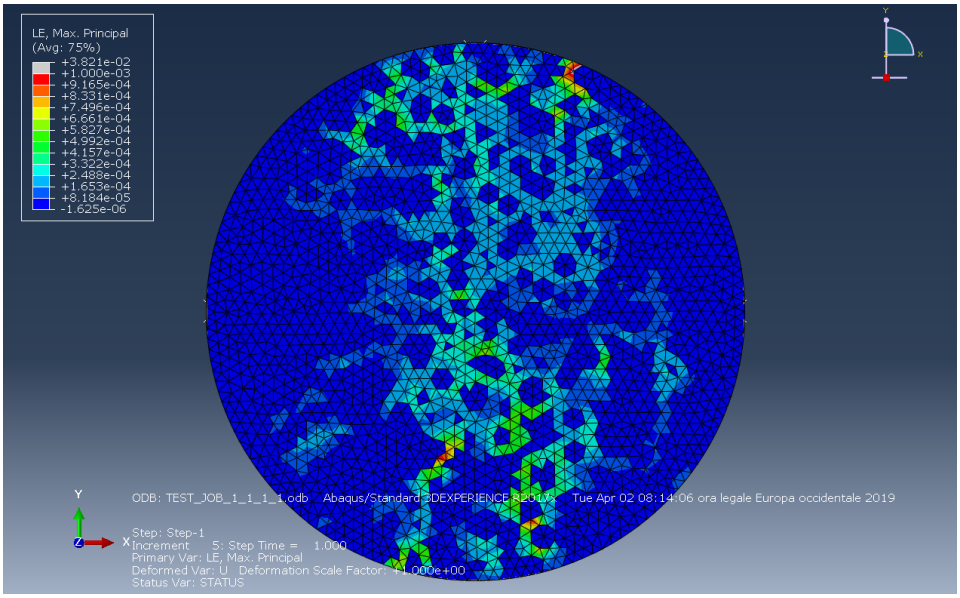
d


ODB: TEST_JOB_1_1_1_1.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2017x Tue Apr 02 08:14:06 ora legale Europa occidentale 2019
Step: Step-1
Increment 5: Step Time = 1.000
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00
Status Var: STATUS

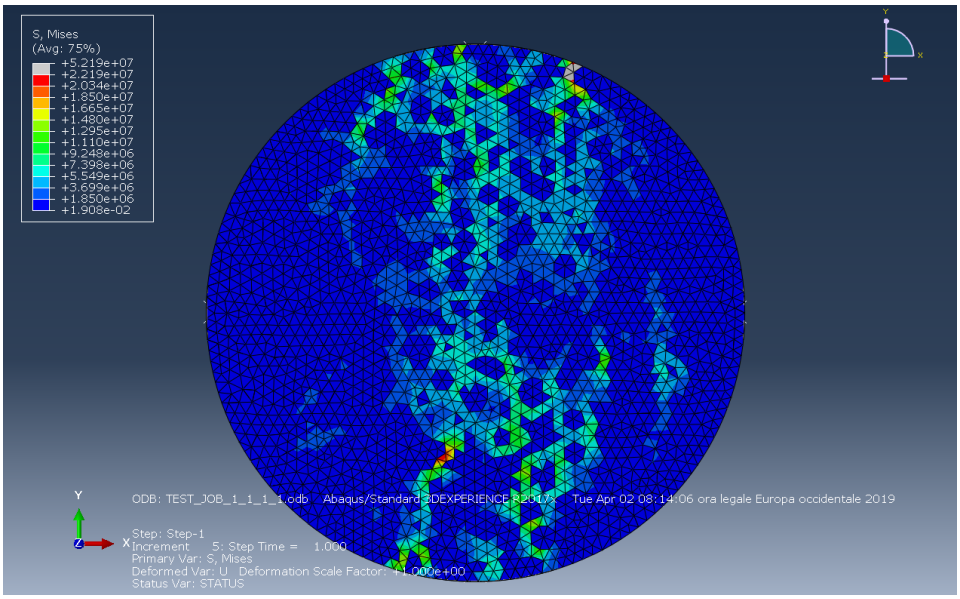
e


LE, Max. Principal
(Avg: 75%)
+8.047e-07
+7.259e-07
+6.472e-07
+5.684e-07
+4.896e-07
+4.108e-07
+3.320e-07
+2.532e-07
+1.744e-07
+9.562e-08
+1.682e-08
-6.197e-08
-1.408e-07
ODB: TEST_JOB_1_1_1_1.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2017x Tue Apr 02 08:14:06 ora legale Europa occidentale 2019
Step: Step-1
Increment 5: Step Time = 1.000
Primary Var: LE, Max. Principal
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00
Status Var: STATUS

f



g



h

Figura 7-9 Rappresentazione della prova di compressione diametrale

7.3 Simulazione di prove a rottura

Come si è avuto modo di evidenziare, il c.b. è un prodotto caratterizzato da una particolare eterogeneità. L'utilizzo di un modello omogeneo per la simulazione di una frattura non si rivela pertanto adatto a perseguire significativamente lo scopo. La semplice modellazione al continuo, infatti, sarebbe poco realistica oltre ad avere parametri difficilmente caratterizzabili e percorsi delle fratture uniformi e lineari alquanto diversi da quelli reali.

Le fratture che si osservano in un c.b. sono, invece, estremamente frastagliate perché presentano cavità e protuberanze che rendono impossibile lo studio e la riproduzione di questi percorsi, se non attraverso un'accurata modellazione numerica del sistema multifase.

La prova di seguito riprodotta, un classico problema della meccanica dei solidi, consiste nell'inflessione di un provino prismatico su tre punti (three point bending test).

Consiste in una trave isostatica semplicemente appoggiata a cui è applicato uno spostamento impresso. In mezzeria, dove si ha la massima sollecitazione flettente, può essere applicato o meno un intaglio in modo tale da assicurare la formazione della frattura nel modo voluto. Nel caso in esame, proprio per evidenziare la spontaneità di apertura della frattura non è stata praticata alcuna cricca iniziale.

Le principali peculiarità del modello sono:

- da un punto di vista dello stato di sollecitazione, si tratta di uno stato tridimensionale di deformazione;
- si utilizzano elementi finiti tetraedrici;
- la forzante è data da uno spostamento impresso.

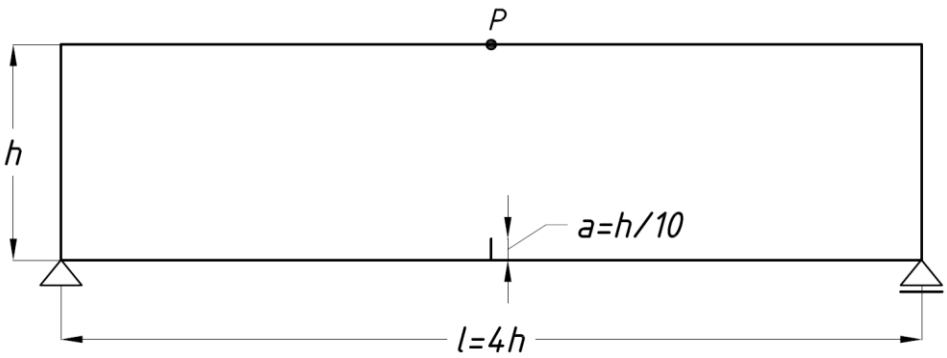


Figura 7-10 – Schema di prova a flessione su tre punti

Riguardo la modellazione del fenomeno di rottura del materiale è stata predisposta una CZM (Cohesive Zone Model) che consiste nell'inserzione di elementi coesivi attorno agli elementi finiti del mastice di bitume. Un'alternativa interessante può essere costituita dall'applicazione della nuova metodologia di analisi *extended finite element method* (XFEM) del solutore Abaqus che consente la formazione e la propagazione di una frattura in problemi quasi statici. Grazie a questa recente implementazione è possibile studiare la propagazione della frattura attraverso un percorso arbitrario e dipendente dalla soluzione, senza la necessità di rimeshare il modello. Ovviamente quanto mostrato è riportato solo a scopo dimostrativo delle potenzialità del modello.

Per quanto concerne il legame costituivo del bitume, il modello di fessurazione coesiva con comportamento elasto-plastico, che segue una legge bilineare *softening*, è largamente utilizzato nelle pubblicazioni scientifiche, tanto per la sua semplicità di applicazione quanto per gli ottimi risultati forniti. Infatti, tramite l'utilizzo di questo legame è possibile modellare efficacemente i fenomeni di microfessurazione, nucleazione e coalescenza della frattura per la formazione finale di una macrofessurazione.

Figura 7-11 - Modellazione della prova

Come mostrato in Figura 7-11, la modellazione del travetto prismatico non è stata estesa all'intera trave ma, per esigenze computazionali, solo ad una porzione di essa mantenendo invariato sia lo schema statico sia il meccanismo di collasso. Le superfici laterali della porzione modellata del travetto sono, infatti, vincolate indirettamente con vincoli di tipo Costrain ai punti di appoggio del

provino e solo su quest'ultimi è applicato il vincolo esterno. Dalle seguenti figure è visibile la fessura che si formata tra aggregati vicini.

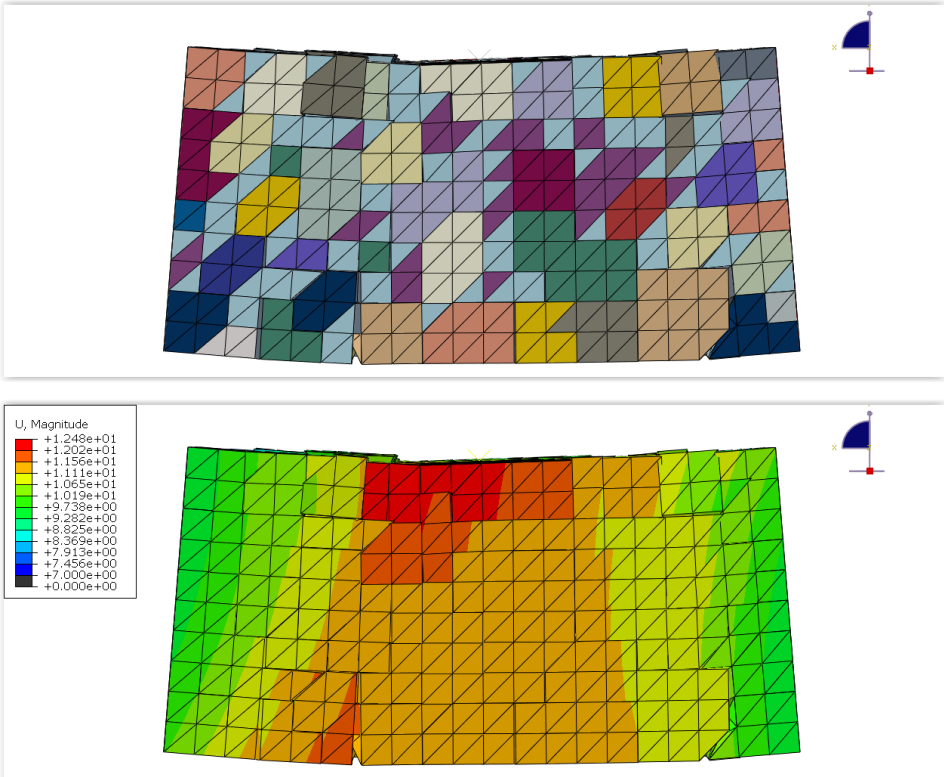


Figura 7-12 - Prova a flessione su tre punti

Il modello proposto è stato anche utilizzato al fine di riprodurre una prova di trazione uniassiale. In questa ulteriore applicazione, come nel caso precedente, è stata adoperata una CZM. Dalle seguenti figure, dove in rosso è rappresentato lo stato di danno degli elementi coesivi, si può evincere che il provino è stato portato completamente a rottura e che la frattura si è propagata nella prossimità di una faccia vincolata.

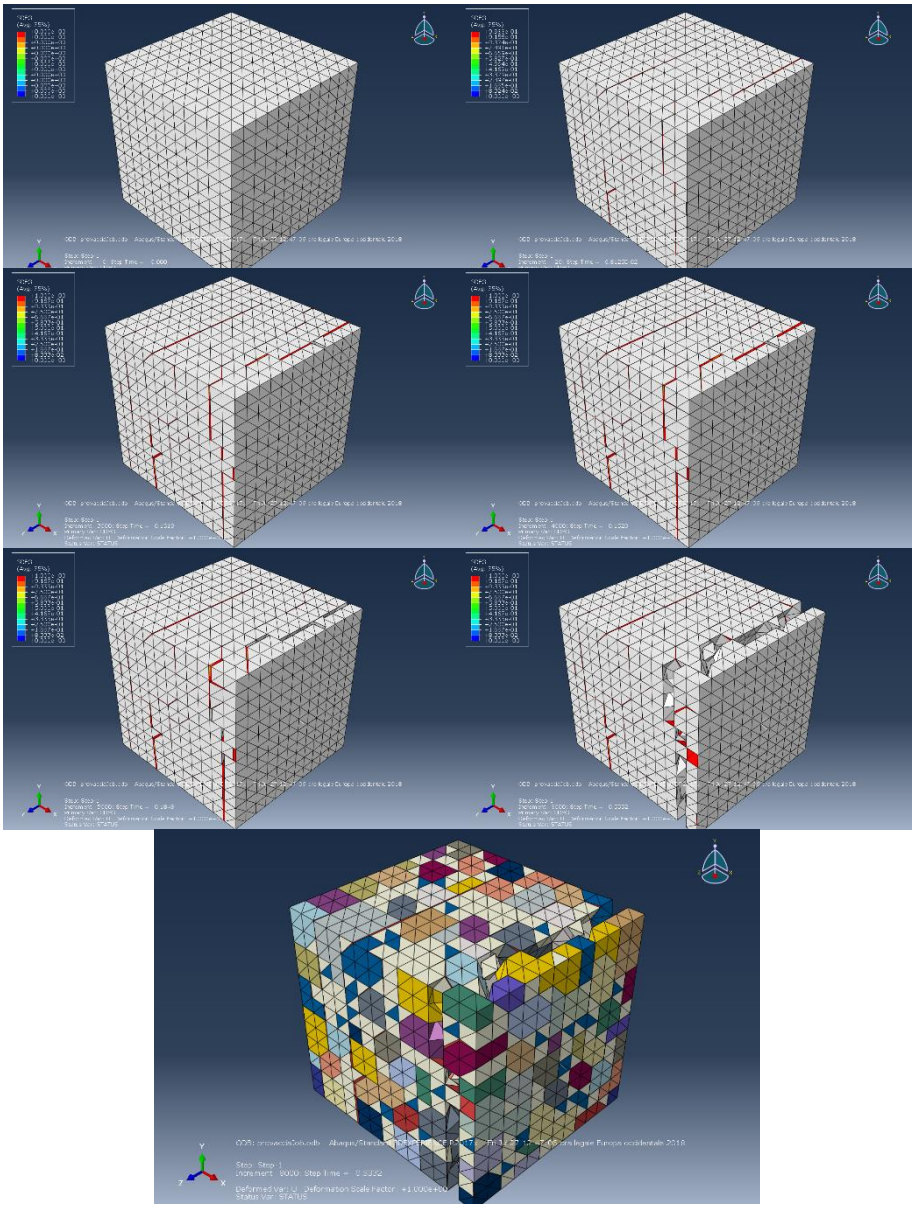


Figura 7-13 - Prova di trazione uniassiale

I risultati finora ottenuti sono incoraggianti anche se rivelano ancora alcuni punti scoperti che meritano di essere trattati, primo fra tutti la verifica di convessità dell'aggregato, attualmente studiata ma non pienamente implementata. Da questi primi risultati si nota come l'effetto di ingranamento tra gli inerti sia certamente più accentuato rispetto agli altri modelli presenti in letteratura proprio grazie al fatto

che aggregati vicini condividono nel presente modello una superficie di contatto.

Sarebbe pertanto possibile attuare una parametrizzazione delle superfici di contatto e delle interazioni meccaniche dirette tra un aggregato e l'altro che consente la formulazione di futuri studi sull'argomento.

Tra i diversi fattori, riguardanti le caratteristiche degli aggregati, particolare attenzione può essere riservata anche all'influenza che la loro forma (parametrizzata come rapporto tra diametro maggiore e diametro minore degli stessi) ha sulla resistenza a rottura per fatica. Si suppone che inerti di forma più allungata conferiscano una maggiore resistenza al conglomerato poiché incrementano l'estensione delle superfici per la formazione delle fessure.

Lo studio del comportamento del materiale a livello di mesoscala potrebbe rilevarsi, pertanto, più proficuo per conoscere e prevedere il comportamento macroscopico di un c.b.

Un punto chiave per la ricerca futura dovrà riguardare sicuramente la calibrazione dei parametri del modello al fine di rappresentare, oltre che qualitativamente, anche quantitativamente il fenomeno della frattura.

8 Conclusioni

La larga diffusione negli ultimi decenni delle simulazioni numeriche per l'analisi mesostrutturale di materiali eterogenei trova la propria ragion d'essere, in special modo, nel conveniente rapporto costi-benefici: in primo luogo, infatti, i metodi numerici eliminano ogni indeterminatezza sia nella fase di caratterizzazione del materiale (circostanza non trascurabile per il c.b.) sia nella fase di test dello stesso; in secondo luogo, l'elevato dispendio di risorse economiche e temporali delle prove sperimentali non è comparabile con le innumerevoli simulazioni numeriche eseguibili a basso costo.

Il rovescio della medaglia riguarda, però, l'attendibilità del modello e la conseguente impiegabilità dei risultati, tanto che essi si pongono sempre come uno strumento di supporto per lo studio teorico del c.b. che, senza alcun dubbio, non può sostituirsi (ma deve affiancarsi) ad una concreta analisi sperimentale, con il fine ultimo di facilitare la valutazione analitica dell'influenza delle variabili mesostrutturali nel materiale.

Alla luce di tutti gli studi passati in rassegna nel presente elaborato circa lo stato dell'arte della materia analizzata, si evince chiaramente come per la modellazione multifase di materiali eterogenei e fra questi, in primis, del conglomerato bituminoso per applicazioni stradali, esistano tutt'oggi molteplici limitazioni tanto di carattere tecnico quanto metodologico.

Come si è avuto modo di sottolineare in più occasioni, proprio tali limiti hanno costituito un incentivo all'interesse verso l'oggetto del presente studio e, di più, si sono rilevati uno stimolo al concepimento di nuove idee che, a loro volta, hanno favorito lo sviluppo originale dell'attività di ricerca.

Senza dilungarsi oltre in questa fase conclusiva, a titolo esemplificativo, basti pensare alla metodologia di modellazione attualmente più diffusa in letteratura, meglio nota "*packing algorithm*", nella quale il conglomerato viene schematizzato come un insieme di particelle disperse in una matrice bituminosa quando, in realtà, è più appropriato studiarlo come una serie di aggregati rivestiti di bitume in stretto contatto tra loro.

Anche se, ad una prima lettura, quest'ultima affermazione può apparire come una sottile differenza, proprio su tale cambio di prospettiva si impernia l'articolata procedura di modellazione proposta, nell'ambito della quale il contatto intergranulare e la procedura di modellazione degli aggregati sono posti sotto la luce dei riflettori.

Il modello proposto, che nel contesto scientifico si inserisce tra i modelli di materiali multifase particellari, ha come caratteristica peculiare l'utilizzo dei "voxel ibridi" (unione del concetto di voxel e di elemento finito) che rappresentano uno strumento agevole ed efficace di modellazione.

Il presente approccio, tralasciando i tradizionali concetti di modellazione presenti in letteratura fondati sull'utilizzo di geometrie precostituite, si pone come una soluzione ibrida tra un sistema FEM ed un DEM, attingendo alle potenzialità di entrambi i metodi non senza ereditare, al contempo, una complicazione non indifferente nella modellazione, sebbene a tutti gli effetti rimanga un modello ad elementi finiti.

La metodologia proposta, sposando appieno questa causa, è in grado di tenere sotto controllo molte variabili durante la costruzione del modello, come ad esempio il fuso granulometrico, il contenuto di bitume, la percentuale dei vuoti, la forma degli aggregati e, contemporaneamente, consente di valutare l'entità dei contatti intergranulari ed altri parametri degli aggregati come i fattori di forma o l'orientamento.

La forte innovatività del modello è giustificata, inoltre, dal numero di fasi in esso presenti poiché, oltre a quelle classiche di letteratura, ovvero aggregati grossi e mastice di bitume, se ne aggiungono altre due costituite dai vuoti e dal film di bitume interposto tra gli aggregati a contatto. L'utilizzo delle quattro fasi appena citate ha consentito, pertanto, un'elevata parametrizzazione del problema ed implicitamente una rilevante complessità. Da un punto di vista puramente prestazionale, l'algoritmo proposto impiega tempi di generazione del modello drasticamente ridotti rispetto ai metodi tradizionali poiché la strategia di inseguimento della curva granulometrica, trattata nel par. 6.2.3, può essere definita

intrinsecamente stabile, fornendo in ogni caso una soluzione al problema. Ciò rappresenta un'importante novità nel panorama letterario poiché gli attuali metodi soffrono pesantemente di problemi di efficienza, adottando un approccio *trial and error* per la collocazione degli aggregati, arrivando alla soluzione estrema di dove scartare un modello solo dopo molte ore di elaborazione.

I risultati finora ottenuti, trattati nel cap. 7, sono molto incoraggianti e, rispetto agli altri modelli presenti in letteratura, mostrano che l'effetto di ingranamento tra gli inerti è più accentuato e, inoltre, che la percentuale di aggregati che possono essere modellati è sensibilmente maggiore arrivando a circa il 75% del volume totale nel caso di conglomerati "aperti". L'algoritmo proposto, infatti, si presta molto bene a riprodurre numericamente tale tipologia di miscela che, proprio la sua modellazione più delicata e complessa rispetto ad un conglomerato "chiuso", trova in letteratura pochissimi studi teorici a riguardo.

Infine, per operare proficuamente col modello sarà necessario condurre una campagna di sperimentazione finalizzata a calibrare quei parametri della miscela che contraddistinguono le diverse fasi. L'approccio proposto viene incontro a tale esigenza potendo eseguire simulazioni non solo del c.b. ma anche dei suoi singoli componenti. Come descritto nel par. 6.3, infatti, il modello in sé si adatta perfettamente al concetto di scalabilità potendo ripetere, utilizzando ovviamente i dovuti accorgimenti, le stesse analisi condotte sul c.b. anche sul mastice di bitume.

La realizzazione del modello proposto, proprio per la sua complessità ed innovazione, ha occupato un parte molto rilevante del periodo di studio ottenendo, a conclusione della ricerca, un risultato certamente promettente e completo in ogni sua parte e, pertanto, meritevole di ulteriori sviluppi. Il presente elaborato si pone dunque, per un verso, come un importante e soddisfacente punto di arrivo della ricerca ma, per l'altro, per le intrinseche potenzialità di cui è portatore, è fortemente auspicabile, che si ponga come un punto di partenza per future analisi più approfondite.

Appendice A Funzioni

```
function [ varargout ] = invertreference ( varargin )
% varagin==etichette,matrice 1,matrice2
%{
il numero di etichette coincide col numero di righe della matrice
la funzione restituisce una matrice invertita rispetto a quella iniziale
dove il numero di righe è pari al numero di elementi diversi nella matrice
di partenza e nelle colonne sono elencati tutte le etichette dove si può
provare quel determinato valore (numero di riga)
%}
base=reshape(varargin{1},[],1);
rows=repmat((1:size(varargin{1},1))',size(varargin{1},2),1);
cols=reshape(repmat(1:size(varargin{1},2),size(varargin{1},1),1),[],1);
toconvert{1}=rows;
for i=2:nargin
toconvert{i}=reshape(varargin{i},[],1);
end
i=0;
a=zeros(size(varargin{1}));
while numel(toconvert{1})>0
   i=i+1;
   [f,ia,ic]=unique(base);
   for j=1:nargin
   varargout{j}(f,i)=toconvert{j}(ia);
   toconvert{j}(ia)=[];
   end
   rowSub=rows(ia);
   colSub=cols(ia);
   selezione=sub2ind(size(a), rowSub, colSub);
   a(selezione)=i;
   base(ia)=[];
   rows(ia)=[];
   cols(ia)=[];
end
varargout{nargin+1}=a;
end
```

Bibliografia

[1] R. Rossano, "L'aderenza in ambito stradale: fattori di influenza e metodi di misura," Politecnico di Milano, 2015.

[2] S. Carrara, "Indagine sperimentale delle proprietà meccaniche e funzionali di strati di usura 'dense–graded' ad emissione acustica ottimizzata per la riduzione del rumore stradale," Politecnico di Milano, 2013.

[3] G. Gatti, "Le pavimentazioni drenanti: aspetti strutturali e funzionali," *Rass. del bitume SITEB*, no. 38, 2001.

[4] AIPCR, "Monitoraggio delle caratteristiche e delle azioni del traffico veicolare per il progetto e la manutenzione delle pavimentazioni stradali," 2006.

[5] J. A. Prozzi and R. Luo, "Quantification of the Joint Effect of Wheel Load and Tire Inflation Pressure on Pavement Response," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 1919, pp. 134–141, 2005.

[6] A. Bertino, "Criteri per l'accettazione degli aggregati e per il mix design delle miscele bituminose secondo le procedure SHRP," Università degli Studi di Messina, 2006.

[7] R. N. Hunter, J. Read, and A. Self, *The Shell Bitumen Handbook*. ICE Publishing, 2015.

[8] F. Petretto, "Le reologia dei leganti bituminosi stradali: studio delle proprietà meccaniche a seguito di processi di 'aging' in laboratorio," Università degli Studi di Bologna, 2012.

[9] A. Pantano, "Caratterizzazione meccanica di Warm Mix Asphalt contenenti scorie di acciaieria," Università degli Studi di Padova, 2015.

[10] B. Marco, "Criteri di calcolo delle pavimentazioni stradali flessibili: i metodi particellari," Alma Mater Studiorum - Università degli Studi di Bologna, 2009.

[11] Z. You, S. Adhikari, and Q. Dai, "Three-Dimensional Discrete Element Models for Asphalt Mixtures," *J. Eng. Mech. ASCE*, vol. 134, no. 12, pp. 1053–1063, 2008.

[12] M. Bragaglia, "Studio del comportamento visco-elastico del conglomerato bituminoso con il metodo degli elementi distinti particellari," Università degli Studi di Bologna, 2007.

[13] C. Van der Poel, "Representation of rheological properties of bitumens over a wide range of temperatures and loading times," in *Proc of 2nd Int Congress on Rheology*, 1954, pp. 331–337.

[14] F. Moavenzadeh and J. Soussou, *Viscoelastic Constitutive*

Equation for Sand Asphalt Mixtures, 256th ed. Record Highway Research, 1968.

[15] A. Scarpas, "Finite Element Simulation of Damage Development in Asphalt Concrete Pavements," in *8th Int. Conf. on Asphalt Pavement*, 1997.

[16] J. B. Sousa and S. L. Weissman, *Modelling Pavement Deformation of Asphalt- aggregate Mixes*, 63rd ed. Asphalt Paving Technology, 1994.

[17] J. B. Sousa, "A Non-Linear Elastic Viscous with Damage Model to Predict Permanent Deformation of Asphalt Concrete Mixes," in *72nd Annual TRB Meeting*, 1993.

[18] J. Uzan, *Asphalt Concrete Characterisation for Pavement Performance Prediction*, 65th ed. Asphalt Paving Technology, 1996.

[19] K. L. Johnson, "Contact Mechanics," *Cambridge Univ. Press*, 1985.

[20] J. E. Fitzgerald and J. Vakili, "Nonlinear Characterization of Sand-asphalt Concrete by Means of Permanent-memory Norms," *Exp. Mech.*, no. 13, pp. 504–510, 1973.

[21] J. S. Lai and D. Anderson, "Irrecoverable and recoverable Nonlinear Viscoelastic Properties of Asphalt Concrete," *Highw. Res. Rec.*, no. 468, pp. 73–88, 1973.

[22] S. T. Dunhill *et al.*, "Advanced constitutive modelling of bituminous materials," *Int. J. Pavement Eng. Taylor Fr.*, vol. 7, no. 3, pp. 153–165, 2006.

[23] L. Tashman, E. Masad, D. Little, and H. Zbib, "A microstructure-based viscoplastic model for asphalt concrete," *Int. J. Plast.*, vol. 21, no. 9, pp. 1659–1685, 2005.

[24] M. Perl, J. Uzan, and A. Sides, "Visco-elasto-plastic constitutive law for a bituminous mixture under repeated loading," *Asph. Mater. Mix. Constr. Moisture Eff. Sulfur, Transp. Res. Rec.*, vol. 911, no. I, pp. 20–27, 1983.

[25] D. A., K. J.R., and N. D.E., "Permanent Deformation in Asphalt Concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 5(1), pp. 112–127, 1993.

[26] Y. Lu, P. J. Wright, L. Y., and W. P.J., "Numerical approach of visco-elastoplastic analysis for asphalt mxtures," *Comput. Struct. Pergamon*, vol. 69, no. 2, pp. 139–147, 1998.

[27] Z. You and W. Buttlar, "Discrete element modeling to predict the modulus of asphalt concrete mixtures," *J Mater Civ. Eng*, vol. 16, no. 2, 2004.

[28] Y. Li and J. B. Metcalf, "Two-step approach to prediction of asphalt concrete modulus from two-phase micromechanical models," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 4, pp. 407–415, 2005.

[29] A. Yin, X. Yang, C. Zhang, G. Zeng, and Z. Yang, "Three-dimensional heterogeneous fracture simulation of asphalt mixture under uniaxial tension with cohesive crack model," *Constr. Build. Mater.*, vol. 76, pp. 103–117, 2015.

[30] S. F. Yang, X. H. Yang, A. Y. Yin, and W. Jiang, "Three-Dimensional Numerical Evaluation of Influence Factors of Mechanical Properties of Asphalt Mixture," *J. Mech.*, vol. 28, no. 03, pp. 569–578, 2012.

[31] R. Xu, X. H. Yang, A. Y. Yin, S. F. Yang, and Y. Ye, "A Three-Dimensional Aggregate Generation and Packing Algorithm for Modeling Asphalt Mixture with Graded Aggregates," *J. Mech.*, vol. 26, no. 2, pp. 165–171, 2010.

[32] P. Cao, F. Jin, D. Feng, C. Zhou, and W. Hu, "Prediction on dynamic modulus of asphalt concrete with random aggregate modeling methods and virtual physics engine," *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 987–997, 2016.

[33] G. Fu and W. Dekelbab, "3-D random packing of polydisperse particles and concrete aggregate grading," *Powder Technol.*, vol. 133, no. 1–3, pp. 147–155, 2003.

[34] I. Kokcharov, "Structure of composites," in *Structural Integrity Analysis*, no. 1, 2013, pp. 1–29.

[35] H. Kim and W. G. Buttlar, "Multi-scale fracture modeling of asphalt composite structures," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 15–16, pp. 2716–2723, 2009.

[36] P. Sheng, J. Zhang, and Z. Ji, "An advanced 3D modeling method for concrete-like particle-reinforced composites with high volume fraction of randomly distributed particles," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 134, pp. 26–35, 2016.

[37] D. S. S. Corp., *SIMULIA User Assistance 2017 - Abaqus/CAE Manual*. 2016.

[38] N. Bali, M. Goyal, and C. Watkins, *Advanced Engineering Mathematics: A Computer Approach*. Infinity Science Press, 2007.

[39] D. S. H. Lo, *Finite Element Mesh Generation*. Saxe-Coburg Publications, 2014.

[40] A. Van Oosterom and J. Strackee, "The Solid Angle of a Plane Triangle," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. BME-30, no. 2, pp. 125–126, Feb. 1983.

[41] T. Belytschko and T. Black, "Elastic Crack Growth in Finite Elements With Minimal Remeshing," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 45, no. July 1998, pp. 601–620, 1999.

[42] J. M. Melenk and I. Babuška, "The partition of unity finite element method: Basic theory and applications," *Comput. Methods Appl.*

Mech. Eng., vol. 139, no. 1–4, pp. 289–314, 1996.

[43] T. J. Truster, "Discontinuous Element Insertion Algorithm," 2015.

[44] Z. Qian, E. J. Garboczi, G. Ye, and E. Schlangen, "Anm: a geometrical model for the composite structure of mortar and concrete using real-shape particles," *Mater. Struct.*, vol. 49, no. 1–2, pp. 149–158, 2016.