



# UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

## FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

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

ANALISI DEL FENOMENO “TOP-DOWN CRACKING”  
SULLA RETE AUTOSTRADALE ITALIANA

*EXPERIMENTAL ANALYSIS OF TOP-DOWN CRACKING  
OF ITALIAN MOTORWAYS*

Relatore:  
Prof. Ing. Francesco Canestrari

Tesi di laurea di:  
Luca Alcini

---

Anno Accademico 2018/2019

# Sommario

Introduzione .....	4
<b>1. TDC: Top-Down Cracking.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Influenza della pavimentazione e dei carichi stradali nello sviluppo del TDC .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 Fenomeni di degrado .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3 TDC: generalità .....</b>	<b>13</b>
<b>1.4 Cause del fenomeno.....</b>	<b>19</b>
<i>Sforzi e deformazioni prodotti dai carichi di traffico .....</i>	<i>20</i>
<i>Sforzi e deformazioni di natura termica .....</i>	<i>32</i>
<i>Gradienti di rigidità dovuti a temperatura e invecchiamento del conglomerato .....</i>	<i>35</i>
<i>Struttura della pavimentazione stradale.....</i>	<i>38</i>
<i>Proprietà della miscela.....</i>	<i>40</i>
<i>Difetti di costruzione .....</i>	<i>43</i>
<b>1.5 Modelli di innesco e propagazione del top-down cracking .....</b>	<b>43</b>
<i>HMA-FM (Hot Mix Asphalt – Fracture Mechanics) .....</i>	<i>44</i>
<i>Modello basato sul calcolo dell'integrale J (Lytton).....</i>	<i>57</i>
<b>1.6 Indici di caratterizzazione sperimentale della resistenza al top-down cracking.....</b>	<b>66</b>
<i>Metodo basato sul concetto di ER (Energy Ratio) .....</i>	<i>67</i>
<i>Texas-Overlay Test .....</i>	<i>71</i>
<i>NCAT-Modified Overlay Test.....</i>	<i>73</i>
<i>Semi-Circular Bend Test.....</i>	<i>74</i>
<i>Illinois Flexibility Index Test .....</i>	<i>76</i>
<i>Indirect Tensile Asphalt Cracking Test.....</i>	<i>78</i>
<i>Uniaxial Penetration Test.....</i>	<i>79</i>
<i>Valutazioni conclusive .....</i>	<i>82</i>
<b>1.7 Interventi di risanamento della pavimentazione.....</b>	<b>84</b>
<b>2. Programma sperimentale .....</b>	<b>87</b>
<b>2.1 Rilievo del dissesto da top-down cracking sulla rete autostradale italiana.....</b>	<b>89</b>
<i>Descrizione della rete-pilota .....</i>	<i>89</i>
<i>Monitoraggio della rete.....</i>	<i>93</i>
<i>Campagna di rilievo.....</i>	<i>98</i>
<i>Dati di traffico.....</i>	<i>106</i>

<b>2.2 Analisi sperimentale in laboratorio</b> .....	115
<i>Analisi dei provini fessurati</i> .....	118
<i>Tenore dei vuoti della miscela</i> .....	119
<i>Rigidità del conglomerato tramite prova di modulo con apparecchiatura NAT</i> .....	122
<i>Resistenza a trazione del conglomerato tramite prova di trazione indiretta</i> .....	130
<b>3. Analisi dei risultati</b> .....	136
<b>3.1 Individuazione della fessurazione da top-down in sito</b> .....	136
<i>Concentrazione della fessurazione superficiale sulla rete autostradale</i> .....	137
<i>Linee guida per il corretto riconoscimento della fessurazione superficiale in sito</i> .....	145
<b>3.2 Analisi sperimentale del top-down cracking</b> .....	155
<i>Legge di propagazione del top-down cracking</i> .....	155
<i>Percentuale dei vuoti sulle miscele drenanti autostradali</i> .....	158
<i>Modulo di rigidità</i> .....	160
<i>Resistenza a trazione indiretta</i> .....	165
<i>Indice di caratterizzazione sperimentale del TDC</i> .....	173
<b>Conclusioni</b> .....	176
<b>Bibliografia</b> .....	179

# Introduzione

A seguito di una profonda evoluzione nel settore dei trasporti, con l'avvento della logistica che tende a privilegiare il trasporto in autostrada (su lunghe distanze) con veicoli prevalentemente a 5 o più assi e dotati di pneumatici singoli radiali in luogo di ruote gemellate, negli ultimi anni si è assistito alla diffusione, sulla rete, di una nuova tipologia di dissesto della pavimentazione denominata top-down cracking. Il fenomeno del top-down (in breve TDC) si manifesta generalmente con una serie di fessure superficiali in direzione prevalentemente longitudinale, in corrispondenza dei bordi della striscia di impronta dello pneumatico sulla pavimentazione. A differenza di un meccanismo di rottura classico, per fatica degli strati legati profondi (bottom-up cracking), il fenomeno ha origine in superficie e si sviluppa progressivamente verso gli strati legati sottostanti. L'innesco e la propagazione della fessurazione sono determinati principalmente da un regime di tensioni verticali e tangenziali al contatto pneumatico-pavimentazione, che raggiunge entità considerevoli proprio in quelle tipologie di mezzi pesanti, ad oggi più diffusi sulla rete autostradale. Il meccanismo di rottura è favorito inoltre dalla presenza di gradienti di rigidità all'interno degli strati legati, dovuti a variazioni termiche o fenomeni di invecchiamento del conglomerato, situazioni esasperate in ambito autostradale dove vi è comunemente l'adozione di una pavimentazione dotata di elevato spessore e di uno strato di usura drenante (quindi caratterizzata da una certa debolezza nei confronti della fessurazione superficiale). Lo studio in esame, in particolare, rientra nell'ambito di un più ampio progetto di ricerca finalizzato all'aggiornamento del sistema di gestione delle pavimentazioni (PMS), richiesto dalla società Autostrade per l'Italia S.p.A., e personalizzato in base alle criticità specifiche della rete autostradale, alla luce dell'evoluzione tecnica dei veicoli commerciali circolanti (le cui particolarità concorrono alla definizione delle sollecitazioni sulla pavimentazione), delle caratteristiche dei nuovi materiali impiegati, e del riscontro di un tasso di degrado più rapido manifestato negli ultimi anni dalle pavimentazioni della rete autostradale, con ripercussioni economiche per la società concessionaria.

In un moderno e valido piano di gestione e manutenzione delle pavimentazioni autostradali, risulta indispensabile considerare il danno da top-down cracking, che ad oggi costituisce una delle tipologie di dissesto superficiale più diffuse sulla rete. Si è proceduto, nel dettaglio, ad una valutazione preliminare del fenomeno del top-down cracking sulla rete autostradale, attraverso un rilievo visivo dei dissesti superficiali della pavimentazione all'interno di alcuni

segmenti autostradali, appositamente selezionati per l'indagine, e attraverso un'analisi sperimentale in laboratorio di campioni prelevati in sito nei punti caratterizzati da fessurazione superficiale. Lo studio si propone di suggerire una metodologia preliminare di indagine, applicabile in ricerche future rivolte alla valutazione dell'evoluzione del TDC sulla rete autostradale, finalizzata al riconoscimento della fessurazione da top-down in sito ed all'analisi sperimentale in laboratorio, per una caratterizzazione valida del problema.

In superficie è possibile infatti rilevare una serie di tipologie differenti di fessurazione superficiale longitudinale (TDC, foratura, giunti di stesa), la cui discriminazione è fondamentale all'interno di un piano di rilievo dei dissesti della pavimentazione. E' auspicabile inoltre la formulazione di una legge analitica di valutazione dello sviluppo del top-down cracking in sito, in cui si mette in relazione la profondità della fessura con il numero di assi transitati durante la vita, differenziando il contributo che ogni diversa tipologia di configurazione di carico produce nel meccanismo di danno.

Nell'ambito di una valutazione su valide metodologie di laboratorio utili per lo studio delle prestazioni del conglomerato nei riguardi del top-down cracking, per mezzo di diverse elaborazioni di prove di modulo e di resistenza a trazione indiretta, è stato possibile intuire l'esistenza di una certa relazione tra le prestazioni del conglomerato e il tenore dei vuoti e l'invecchiamento della pavimentazione, ma per una lettura più completa della situazione è presumibilmente necessario considerare altri parametri della miscela, determinanti per l'innescio del fenomeno. In tal senso, per una caratterizzazione sintetica del problema, è utile considerare indici sperimentali, derivanti dall'elaborazione di prove di laboratorio, che attraverso un singolo parametro sono in grado di offrire una descrizione in merito alla resistenza a fessurazione superficiale della miscela esaminata. Un esempio di tal genere è costituito dal CTindex, indice derivante dall'esecuzione di una prova a trazione indiretta, e analizzato nel presente studio.

# 1. TDC: Top-Down Cracking

## 1.1 Influenza della pavimentazione e dei carichi stradali nello sviluppo del TDC

Il fenomeno del top-down cracking, come si vedrà nel dettaglio più avanti, nella sezione relativa all'analisi dei fattori determinanti per lo sviluppo, è marcatamente condizionato dalla sezione stradale e dai carichi veicolari trasmessi sulla pavimentazione. È ormai riconosciuto infatti che tale tipologia di dissesto viene favorita in presenza di un multistrato di elevato spessore ed è causata principalmente dagli sforzi trasmessi all'interfaccia pneumatico-pavimentazione al passaggio di mezzi pesanti. È quindi doveroso, alla luce di tale situazione, presentare una descrizione introduttiva sulle sezioni e sui carichi stradali, con particolare riferimento alle tipicità della rete autostradale, oggetto del presente studio.

Per sovrastruttura (o pavimentazione) si intende la parte superiore del corpo stradale normalmente realizzata in più strati e direttamente interessata dal moto dei veicoli. Per via delle interazioni dirette con il traffico, uno stato di piena efficienza della sovrastruttura durante l'intero arco della propria vita di esercizio costituisce condizione essenziale per garantire idonee condizioni di sicurezza e comfort della circolazione.

Sia che si tratti di sovrastruttura flessibile, rigida o semi-rigida, è necessario raggiungere e mantenere nel tempo alcuni requisiti fondamentali, quali [1]:

- capacità di trasmissione dei carichi veicolari al sottofondo;
- resistenza ai fenomeni di degrado strutturale;
- regolarità e aderenza della superficie viabile;
- resistenza alle azioni dell'acqua e del gelo;
- sostenibilità ambientale.

In particolare, in tale sede di studio si focalizzerà l'attenzione sulle pavimentazioni flessibili, caratterizzate dalla presenza di un insieme di strati in conglomerato bituminoso poggianti su uno strato di fondazione in materiale granulare.

La figura 1.1 riporta una sezione tipica di sovrastruttura flessibile.

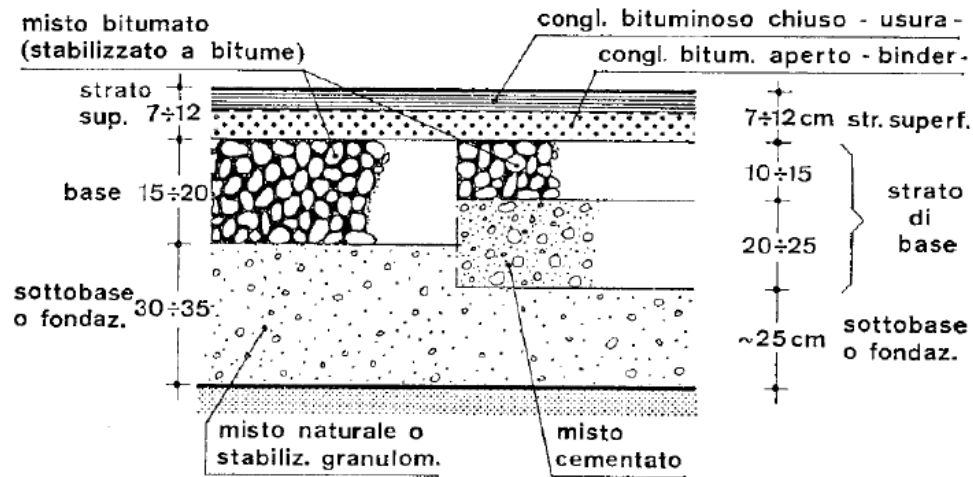


Figura 1.1: schema stratigrafico di una pavimentazione flessibile

Il pacchetto legato è costituito dalla sovrapposizione di tre strati, denominati rispettivamente usura, binder (collegamento) e base. Completa la stratigrafia uno strato di fondazione in materiale non legato di tipo misto granulare talvolta preceduto da uno strato in misto cementato (utilizzato in particolar modo per pavimentazioni ad alto carico di traffico dove sono richieste prestazioni strutturali notevoli), posto tra il pacchetto legato e il sottofondo. Uno degli elementi principali che contraddistingue la pavimentazione flessibile è la presenza del legante bituminoso che, con le sue proprietà visco-elastiche e termo dipendenti, conferisce all'intera struttura una spiccata dipendenza dalle condizioni climatiche e dal tempo di applicazione (o frequenza) dei carichi veicolari.

I vari strati in conglomerato bituminoso assolvono a funzioni diverse e differiscono, pertanto, per la loro composizione e le caratteristiche volumetriche finali.

Il manto di usura è pensato per resistere alle azioni tangenziali trasmesse dagli pneumatici, presentare una superficie di rotolamento regolare, avere caratteristiche di rugosità tali da assicurare adeguate condizioni di aderenza (grip) soprattutto in condizioni umide, e possedere una sufficiente impermeabilità al fine di impedire la penetrazione delle acque meteoriche negli strati profondi (eccetto ovviamente il caso dei manti drenanti).

Lo strato di binder abbina a una funzione strutturale di trasmissione delle sollecitazioni derivanti dai carichi agenti sul manto di usura allo strato di base, anche una funzione costruttiva, volta a realizzare un piano di stesa regolare per il manto superficiale. Contribuisce inoltre ad assorbire le sollecitazioni a flessione, e garantisce continuità e regolarità tra gli strati.

Lo strato di base ha come compito esclusivo quello di ripartizione dei carichi rendendo la loro azione, in termini di tensioni e deformazioni, compatibile con la capacità portante del sottofondo.

La realizzazione di più strati legati tra loro differenti è dettata anche da ragioni di carattere operativo ed economico. Per quanto attiene al primo aspetto, la messa in opera di un unico strato di spessore molto elevato non consentirebbe, infatti, una compattazione adeguata, ragion per cui, occorre procedere con spessori di stesa più ridotti. In relazione al secondo aspetto, si ammette in genere una progressiva diminuzione della qualità dei materiali quanto più ci si allontana dalla superficie viabile e dunque dall'azione diretta dei veicoli. Nella fattispecie, mentre per gli strati di usura si rende necessario l'impiego di aggregati ad alta resistenza e un più elevato dosaggio di bitume, nel caso degli strati sottostanti (in particolare la base) è possibile utilizzare aggregati meno pregiati e un minor quantitativo di legante.

Anche lo strato di fondazione svolge un ruolo preminentemente strutturale. Esso è costituito da materiale non legato stabilizzato granulometricamente e ben compattato (misto granulare), dotato di predefiniti requisiti fisico-meccanici e non sensibile all'acqua. La fondazione permette altresì di realizzare una superficie di appoggio regolare per la stesa dello strato di base e di quelli successivi, funge da protezione del terreno di sottofondo e da filtro nei riguardi di eventuali risalite capillari.

Nella pavimentazione flessibile la diffusione dei carichi dalla superficie al sottofondo avviene secondo un sistema stratificato e il modello strutturale cui si fa riferimento è il multistrato elastico (lineare e non). Un aspetto essenziale per il corretto comportamento strutturale è legato alla perfetta adesione tra gli strati attraverso la realizzazione di mani d'attacco e di ancoraggio, al fine di consentire la corretta trasmissione degli sforzi d'interfaccia.

Come già accennato in precedenza, oltre allo schema classico appena descritto esistono altre soluzioni tipologiche annoverabili nella categoria delle sovrastrutture flessibili. Una variante molto utilizzata, comunemente denominata pavimentazione semi-rigida (figura 1.2), presenta, in aggiunta alla stratigrafia tradizionale, un ulteriore strato di fondazione in misto cementato posto tra il pacchetto legato e lo strato in misto granulare. Il misto cementato è un materiale granulare stabilizzato con l'aggiunta di un legante idraulico in misura, di regola, del 2-4 % in peso, dotato di rigidità notevolmente superiore rispetto al misto granulare, anche se nettamente inferiore a quella di un conglomerato cementizio. Grazie a tali caratteristiche, lo strato in misto cementato contribuisce a incrementare la capacità portante della pavimentazione e a garantire così una vita utile sufficientemente estesa anche in



presenza di forti volumi di traffico pesante, quali quelli che caratterizzano la rete autostradale italiana sulla quale tale soluzione è molto diffusa.

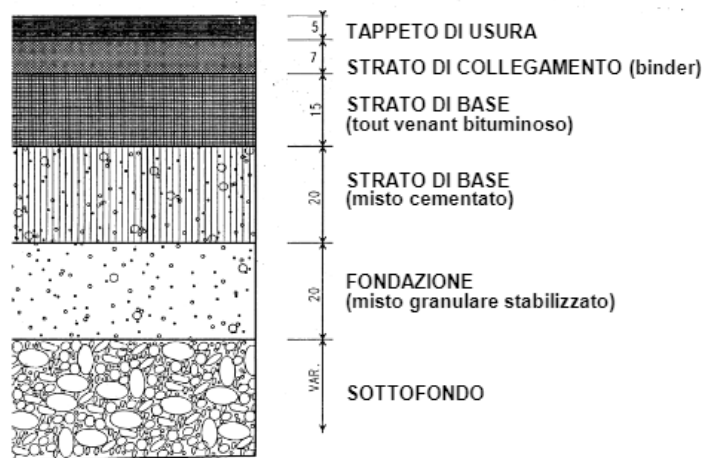


Figura 1.2: schema stratigrafico di una pavimentazione semi-rigida

Un'ultima variante, che riguarda lo strato di usura tradizionale, è costituita dall'utilizzo di una pavimentazione drenante e fonoassorbente. Tale scelta è spesso impiegata nella rete autostradale e, in generale, in strade con velocità di percorrenza elevate. In questo caso il tappeto di usura tradizionale è sostituito da uno strato di conglomerato bituminoso (di spessore compreso tra 4-6 cm) dotato di un elevato volume di vuoti tra loro interconnessi, cui consegue elevata permeabilità e riduzione delle emissioni sonore. L'acqua di superficie penetra all'interno del tappeto drenante e defluisce ai lati della carreggiata, per effetto della pendenza trasversale, lungo la sottostante superficie del binder, la quale deve essere pertanto resa impermeabile onde impedire la percolazione in profondità. Essendo dotato di elevata porosità, la resistenza meccanica è alquanto ridotta per cui nel progetto il suo contributo strutturale può essere trascurato, inoltre rappresenta lo strato superficiale che prima di tutti si oppone alla formazione del top-down cracking, per cui la conoscenza delle sue proprietà composizionali è sicuramente imprescindibile per una corretta valutazione delle prestazioni della pavimentazione nei riguardi della fessurazione da top-down.

In tale studio, si focalizzerà l'attenzione sul pacchetto degli strati bituminosi poiché il fenomeno del top-down cracking interessa gli strati legati ed in particolar modo lo strato di usura; inoltre considerando l'ambito di ricerca specifico, cioè inerente alla rete autostradale italiana, ci si troverà di fronte generalmente a pavimentazioni stradali nella cui stratigrafia è presente misto cementato (cosiddette pavimentazioni semi-rigide) e strato di usura drenante,

due soluzioni che favoriscono l'innescò della fessurazione superficiale (elevato spessore e rigidità del multistrato e porosità dello strato di usura).

Oltre alla conoscenza della sezione della sovrastruttura stradale, dato fondamentale di ingresso per la progettazione e lo studio della pavimentazione sono i carichi stradali, ed in particolar modo il traffico, che unitamente alle sollecitazioni di natura climatica, rappresenta la causa primaria di degrado. Infatti, definire la vita utile di una pavimentazione in termini di anni non ha alcun significato se non si correla tale durata all'entità e alla tipologia dei mezzi che si prevede vi transiteranno. Bisogna in particolare prendere in considerazione diversi fattori:

- le caratteristiche del sistema di assi dei veicoli;
- il numero di ripetizioni per ciascun asse;
- la velocità di percorrenza.

Il sistema costituito dagli assi delle ruote è di fondamentale importanza poiché determina le modalità con cui il peso del veicolo si trasmette alla superficie stradale. Ogni asse è caratterizzato dalla sua configurazione (singolo o multiplo), dal carico totale e dal numero delle ruote (singole o gemellate). Per valutare la composizione del traffico che interessa la pavimentazione molto spesso non si dispone di dati direttamente rilevati, ma è possibile fare riferimento a spettri di traffico standard, come per esempio quelli proposti all'interno del Catalogo Italiano delle Pavimentazioni. Inoltre, in talune circostanze, anziché considerare singolarmente ogni veicolo, nello studio dei carichi stradali, si fa riferimento ad un unico asse standard (ESAL, Equivalent Single Axle Load) omogeneizzando tutto il traffico a esso attraverso predefiniti criteri di normalizzazione [1]. Poiché l'innescò della fessurazione da top-down è fortemente influenzato dalla configurazione del carico trasmesso sulla pavimentazione (tipo di asse, entità del carico, tipologia di pneumatico), il dato di traffico appena descritto è fondamentale per una corretta valutazione del problema.

## 1.2 Fenomeni di degrado

Il dimensionamento della sovrastruttura stradale non differisce concettualmente da quello di qualunque altra opera dell'ingegneria civile: note le condizioni al contorno, stabilita la geometria dell'opera e assegnate ai materiali le rispettive proprietà meccaniche, il calcolo mira a verificare la resistenza nei riguardi dei carichi di esercizio. Nel caso specifico tale resistenza è correlata ai diversi fenomeni di degrado che si manifestano nella pavimentazione durante il suo periodo di servizio, generati dall'azione combinata del traffico e delle sollecitazioni di natura termica. Le procedure di dimensionamento dunque sono volte a

contrastare l'insorgenza di detti fenomeni (o contenerli entro limiti accettabili) oltre un limite temporale (vita utile) [1].

Nel caso delle sovrastrutture flessibili si possono individuare tre principali tipi di dissesto [2]:

- fessurazione:
  - fessurazione da fatica
  - fessurazione di origine termica
  - fessurazione da riflessione
- ormaiamento:
  - ormaiamento detto “primario”
  - ormaiamento detto “secondario”
- perdita di tessitura superficiale

La fessurazione da fatica si manifesta attraverso una serie di fessure tra loro interconnesse e disposte in modo diffuso lungo le direttrici di impronta degli pneumatici. Per la sua particolare forma, tale fessurazione è detta “a pelle di cocodrillo” o “a ragnatela”. Come si evince dalla denominazione stessa, lo stato fessurativo è generato dalla rottura degli strati in conglomerato bituminoso dovuta alle sollecitazioni cicliche di flessione trasmesse dai veicoli. Il ripetersi di tale meccanismo porta a un progressivo accumulo del danno fino alla rottura. In genere la fessura si innesca alla base dello strato legato più profondo (in quanto più deformato) per propagarsi in superficie (meccanismo cosiddetto *bottom-up*); in particolari condizioni esiste anche un processo inverso di innesco, dalla superficie verso il basso (*top-down*) considerato da fatica proprio perché caratterizzato dal ripetersi di cicli di sollecitazione, che comunque, come si vedrà nel dettaglio in seguito, presenta caratteristiche differenti rispetto alle tipicità del meccanismo *bottom-up*.

Per una trattazione completa si riporta una breve descrizione delle altre tipologie di dissesto, anche se non saranno trattate nell'ambito di tale studio. Seguendo tale filo logico, anche una fessurazione di origine termica può considerarsi in generale da fatica poiché caratterizzata dal ripetersi di cicli di sollecitazione, tuttavia viene considerata dalla letteratura comune un fenomeno a sé per la diversa origine della sollecitazione, la quale non deriva direttamente dal traffico (come nel caso di *bottom-up* e *top-down*) ma è legata prevalentemente a condizioni ambientali. Essa si verifica allorché un repentino abbassamento della temperatura determina negli strati bituminosi l'insorgenza di uno stato di coazione (per contrazione impedita) che supera la resistenza a trazione degli stessi. Anche se, come si è

detto in precedenza, una fessurazione di origine termica è stata associata al ripetersi ciclico di brusche variazioni di temperatura, c'è da segnalare che tale tipo di rottura può avvenire in presenza di condizioni particolari anche in conseguenza di un singolo evento.

In ultimo, fa parte della categoria generale di dissesto definita di fessurazione, la fessurazione da riflessione che si manifesta con la risalita di una fessura negli strati bituminosi superficiali innescata da difetti preesistenti o giunti negli strati di base sottostanti. Al contrario, l'ormaiamento può essere definito come la formazione di depressioni (dette appunto ormaie) sulla superficie stradale che si sviluppano in direzione longitudinale lungo le direttrici di impronta degli pneumatici. L'ormaia, nel dettaglio, è generata dal progressivo accumulo di deformazioni permanenti a seguito del ripetuto passaggio dei veicoli, favorito da temperature ambientali relativamente elevate. Nello specifico, si può definire "ormaiamento primario" l'accumulo di deformazioni permanenti imputabile agli strati legati, mentre "ormaiamento secondario" l'accumulo di deformazioni permanenti che interessa il sottofondo o gli strati non legati.

In conclusione, si può annoverare tra le varie forme di dissesto di una pavimentazione flessibile, la perdita delle caratteristiche di tessitura superficiale, dovuta all'azione levigante connessa al passaggio delle ruote che, unitamente agli effetti disgreganti dell'acqua e del gelo, provocano una progressiva asportazione della micro-rugosità dei grani lapidei esposti in superficie e la riduzione della macro-rugosità del manto, fino a renderlo molto liscio.

Nell'immagine seguente (figura 1.3) viene riportato in maniera schematica, la panoramica dei tipi di dissesto principali di una sovrastruttura flessibile (la fessurazione da top-down viene riportata con il nome "surface cracking").

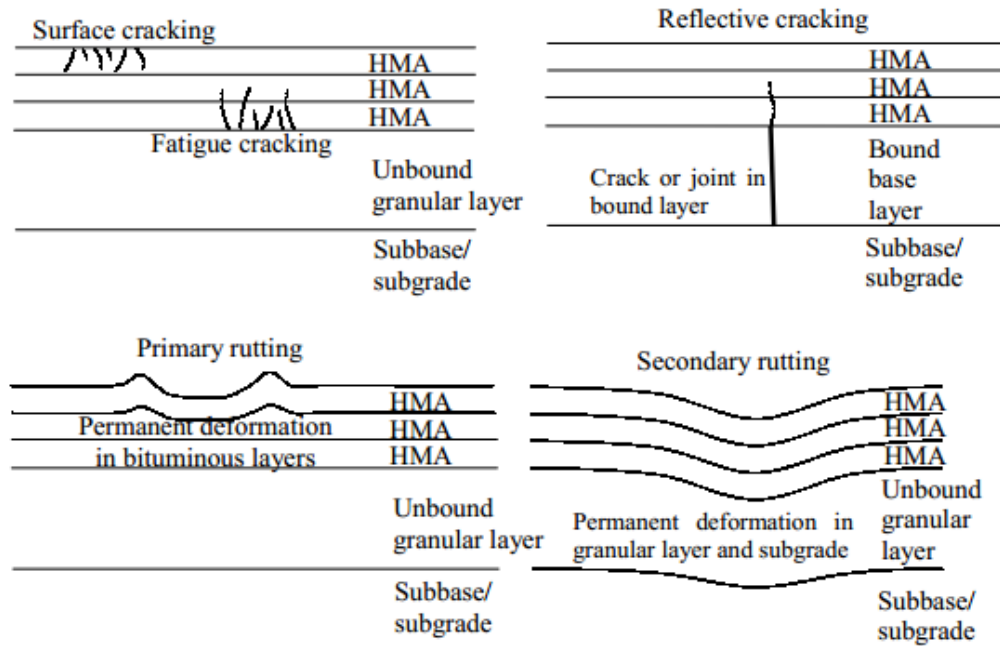


Figura 1.3: principali tipi di dissesto di una pavimentazione flessibile

### 1.3 TDC: generalità

Come già introdotto nella descrizione sintetica dei principali dissesti di una pavimentazione flessibile, riportata in precedenza, il fenomeno del top-down cracking può essere studiato, in generale, come un meccanismo di rottura per fatica (allo stesso modo della fessurazione da bottom-up). La fatica è un fenomeno di deterioramento del materiale causato dal ciclico ripetersi di sollecitazioni che, pur non raggiungendo valori prossimi al carico di rottura del sistema, ne provoca comunque la crisi. Anche se in seguito si riporterà una presentazione dettagliata delle cause particolari del top-down cracking, in generale si può dire che i fattori rilevanti per una fessurazione da fatica sono le caratteristiche del carico agente in superficie (entità, tipo e distribuzione), le condizioni ambientali della pavimentazione (temperatura, gelo), le proprietà dei materiali legati (proprietà volumetriche, proprietà meccaniche), la risposta strutturale del multistrato. Sebbene sia il meccanismo di rottura da bottom-up sia il meccanismo di rottura da top-down sono inquadrati nella categoria comune di “fessurazione da fatica”, i due fenomeni presentano caratteristiche e modalità di innesco assai diverse. Il “bottom-up cracking” infatti, è essenzialmente legato alla rottura per flessione alla base degli strati in conglomerato bituminoso, in corrispondenza dell’impronta di carico e visivamente si manifesta con una fessurazione che dalla base degli strati legati (punto in cui si innesca) si propaga verso la superficie.

Al contrario una fessurazione tipo “top-down” appare visivamente con una serie di fessure longitudinali e/o trasversali che si innescano sulla superficie della pavimentazione e si propagano verso gli strati legati sottostanti (figura 1.4). Negli ultimi anni è un tipo di dissesto sempre più riscontrato nelle sovrastrutture stradali di diversi Paesi di tutto il mondo. Numerosi studi in sito hanno mostrato come la maggioranza delle fessure tipo top-down siano localizzate in prossimità dell'impronta dello pneumatico.



Figura 1.4 : esempio di pavimentazione affetta da top-down cracking

Nella figura sottostante (figura 1.5 a-b) è riportata la schematizzazione dei due meccanismi di dissesto da fatica: bottom-up cracking e top-down cracking.

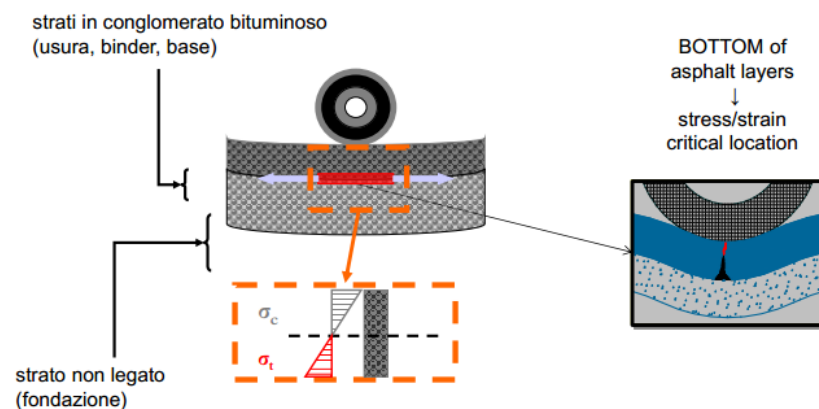


Figura 1.5 a: schematizzazione del bottom-up cracking

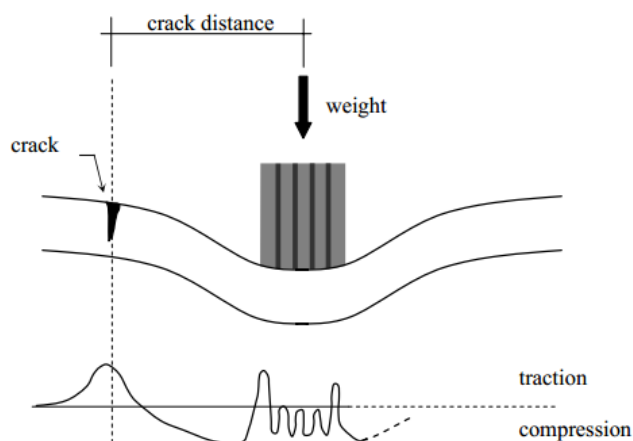


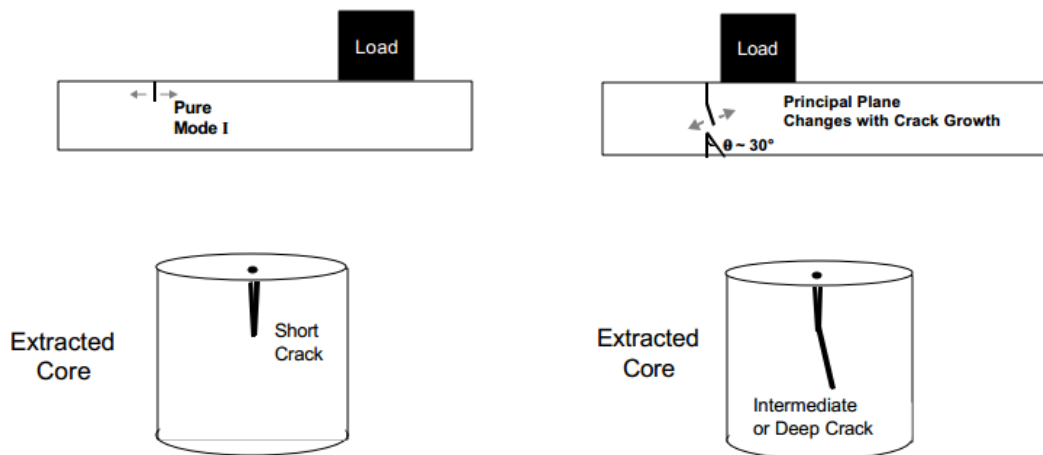
Figura 1.5 b: schematizzazione del top-down cracking (meccanismo di rottura per flessione)

In particolare lo sviluppo di una fessurazione da top-down procede, in modo semplificato, in tre fasi (vedi figura 1.6): il primo stadio, in particolare, consiste nella formazione di una singola fessura nelle vicinanze della striscia di impronta degli pneumatici; con il passare del tempo, in una seconda fase, la fessura longitudinale originaria si espande in lunghezza e nuove fessure longitudinali parallele ad una distanza di circa 0.30-1.00 m dalla precedente si innescano (cosiddette “sister cracks”); in ultimo il TDC evolve in una vera e propria fessurazione “a ragnatela” (visivamente speculare a quella associata ad un fenomeno di bottom-up cracking), dove fessure trasversali si uniscono ai dissesti in direzione longitudinale formando una maglia fessurata sulla pavimentazione stradale [3,4].



Figura 1.6: sviluppo del fenomeno del top-down cracking in tre fasi: fase 1 (a); fase 2 (b); fase 3 (c)

In sezione, la direzione di propagazione della fessura è strettamente legata all'orientamento delle tensioni principali nel piano. La direzione di crescita della fessura subisce un netto cambiamento nel momento in cui si passa da una fessura di profondità modesta ad una fessura di profondità intermedia. Myers e Roque propongono una divisione drastica tra i due stadi di sviluppo della fessurazione poiché il fenomeno evolve con caratteristiche diverse: in corrispondenza di fessure di esigua lunghezza, la propagazione è guidata da sollecitazioni di trazione pura e la crepa si sviluppa in direzione perfettamente verticale verso il basso; a profondità intermedie, l'orientamento delle tensioni principali subisce un'inclinazione di circa  $30^\circ$  rispetto al piano verticale nel verso del carico applicato (figura 1.7). Cambiamenti nella direzione di propagazione possono comunque essere imputabili ad altri fattori come la configurazione dei carichi sulla pavimentazione e inoltre, in particolar modo, l'introduzione di gradienti di rigidezza all'interno della sovrastruttura stradale (in generale si può affermare che la direzione di sviluppo della fessura rientri nel range  $20^\circ - 40^\circ$  rispetto al piano verticale verso il carico applicato) [5]. In tal senso non è da escludere che due fessure longitudinali parallele, formatesi rispettivamente in prossimità del bordo destro e sinistro dell'impronta dello pneumatico, e propagatesi in profondità con un angolo rispetto al piano verticale, nel verso del carico, arrivino a congiunzione e portino ad una rottura generalizzata degli strati legati superficiali.

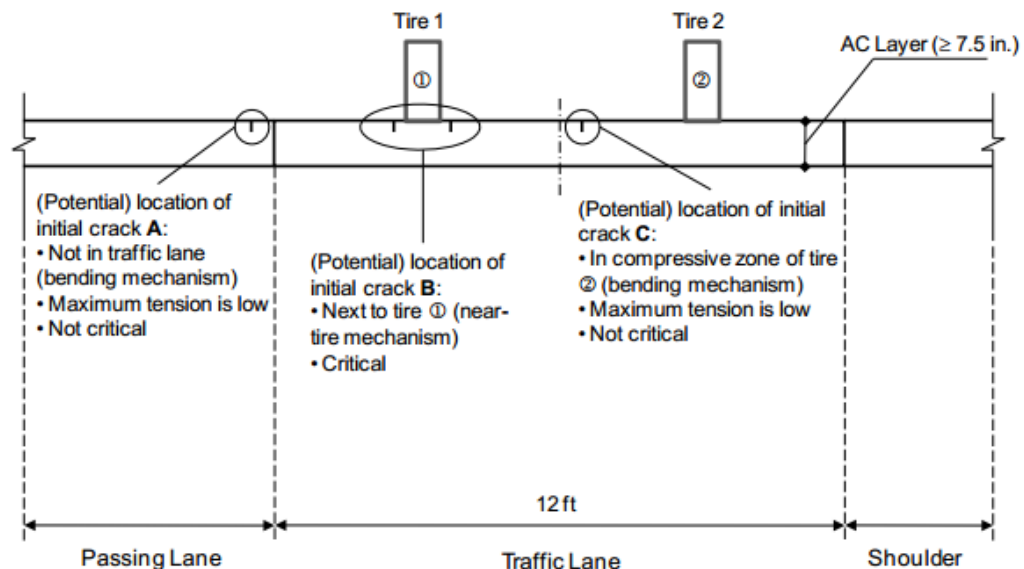


**Figura 1.7:** schematizzazione della propagazione della fessura da TDC in profondità

A differenza del bottom-up, il fenomeno del top-down cracking può svilupparsi secondo due diversi meccanismi. In passato, infatti, si pensava che tale tipologia di dissesto si innescasse unicamente nella medesima maniera del meccanismo da fatica degli strati legati di base, per flessione degli strati superficiali che causavano compressione in corrispondenza



dell'impronta dello pneumatico e sollecitazioni di trazione ai lati, in direzione trasversale della pavimentazione (figura 1.5 b). Seppur tale situazione interessa indubbiamente le pavimentazioni stradali, e in modo particolare pavimentazioni di esiguo o medio spessore, si ritiene ormai in modo univoco che la fessurazione da top-down, specialmente in pavimentazioni di notevole spessore, possa essere associata principalmente al regime non uniforme di tensioni tangenziali e di taglio che si originano all'interfaccia pneumatico-pavimentazione [6]. Entrambi i meccanismi descritti (figura 1.8), e in particolar modo la seconda tipologia, divengono maggiormente critici con l'invecchiamento della miscela. L'innesco del top-down cracking può essere influenzato da stress termici e dalla presenza di zone danneggiate; dopo che la fessurazione ha avuto inizio, difetti della superficie stradale a cui conseguono una redistribuzione e un'intensificazione degli sforzi, soprattutto in presenza di gradienti di rigidezza nel pacchetto degli strati legati, rivestono un ruolo determinante nella propagazione del dissesto [3,4,5].



**Figura 1.8:** schematizzazione dei due meccanismi di innesco della fessurazione da top-down, in cui si evidenzia come la tipologia B (in prossimità dell'impronta dello pneumatico) sia quella principale

Per comprendere al meglio il fenomeno, è chiaro come sia necessario effettuare un'analisi dettagliata sulle cause e sui fattori che intervengono nel meccanismo di formazione del top-down cracking, proprio perché tale tipologia di danno presenta caratteri assai peculiari rispetto alla classica fessurazione da fatica per flessione degli strati di base. Accade spesso infatti che il top-down cracking si manifesti proprio in quelle pavimentazioni stradali relativamente spesse che riescono a fronteggiare al meglio il bottom-up cracking. In tali pavimentazioni, tipiche della rete autostradale italiana, infatti, le proprietà strutturali del

multistrato (elevato spessore) e le migliorate prestazioni delle miscele impiegate negli ultimi anni, fanno sì che durante la propria vita utile la pavimentazione non presenti problemi né in merito a fenomeni di bottom-up né in merito a fenomeni di ormaiamento; è in tale contesto che allora si manifesta, ancor prima che la pavimentazione arrivi a rottura per fatica degli strati legati di base, una situazione di danno tramite meccanismo tipo top-down. In pavimentazioni del genere, molto robuste, gli sforzi trasmessi all'interfaccia pneumatico-superficie, che come si vedrà meglio nel seguito, costituiscono il fattore determinante per l'innescò della fessurazione superficiale, subiscono una certa amplificazione, a causa di una sovrastruttura stradale di notevole spessore.

Le principali metodologie di progettazione e verifica di una pavimentazione stradale, basate sull'utilizzo di condizioni al contorno medie, si rivelano inadeguate nella previsione di tale tipo di dissesto che invece si presenta particolarmente come un fenomeno di natura puntuale (la distribuzione degli sforzi all'interfaccia pneumatico-pavimentazione è determinante nell'innescò del fenomeno, e tale situazione non può essere allo stesso modo descritta da una distribuzione di sforzi uniforme di valore equivalente). Una comprensione completa dei caratteri del top-down cracking può, in conclusione, suggerire metodi di rilievo e di intervento più adatti alla problematica con benefici sia di tipo qualitativo sia di tipo economico [4]. È immediato come sia necessario lo sviluppo e l'utilizzo di modelli di propagazione, e quindi di software di calcolo, differenti rispetto a quelli utilizzati per lo studio degli altri meccanismi di rottura di una pavimentazione stradale. In particolare, in tale sede di studio, si descriveranno brevemente i fondamenti teorici alla base dei modelli sviluppati, in tempi recenti, in merito al top-down cracking, al fine di comprendere al meglio i parametri che influenzano il fenomeno, mentre si porrà meno attenzione all'implementazione informatica che deriva da questi ultimi.

In aggiunta, non c'è, ad oggi, un consenso unanime su prove di laboratorio che, in maniera efficace, abbiano la capacità di offrire una previsione sulle capacità di resistenza al TDC della miscela di conglomerato bituminoso. Tuttavia, nell'ambito di ricerche recenti, si è arrivati ad una prima individuazione di una serie di tests e pratiche di laboratorio che, tramite indici di resistenza, descrivono, in maniera sintetica, più o meno accuratamente, attraverso l'utilizzo di un singolo parametro, le capacità prestazionali nei confronti del meccanismo di tipo top-down di una generica miscela oggetto di indagine.

## 1.4 Cause del fenomeno

La tipologia di dissesto denominato “top-down cracking” consiste in un meccanismo di rottura della pavimentazione con innesco negli strati superficiali e propagazione verso gli strati legati più profondi. Il fenomeno è essenzialmente legato ad una distribuzione non uniforme degli sforzi tangenziali originatisi all’interfaccia pneumatico-pavimentazione e amplificati da diversi fattori secondari come la presenza di gradienti di rigidità all’interno degli strati in conglomerato bituminoso dovuti ad aging (invecchiamento ossidativo del conglomerato) e fenomeni termici.

Come già anticipato in precedenza, il meccanismo di innesco e propagazione presenta sostanziali differenze rispetto al “classico” meccanismo di rottura per fatica degli strati legati di base (“bottom-up cracking”) e di conseguenza anche i vari fattori che lo regolano sono diversi. In particolare, le diverse cause di sviluppo del top-down cracking possono essere inquadrate all’interno di due categorie generali [3]:

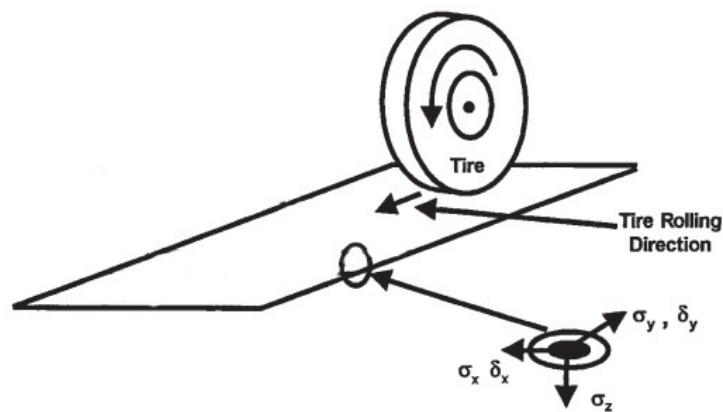
- importante regime di tensioni e deformazioni indotto da carichi di traffico, temperatura e altri fattori;
- esigua resistenza a trazione e a fatica dei materiali in conglomerato bituminoso dovuta a proprietà della miscela, invecchiamento o hardening del conglomerato e difetti nelle pratiche di costruzione.

Sebbene la ricerca e lo studio riguardo la fessurazione da top-down sia attuale e in continua evoluzione, ad oggi, analizzando i vari testi presenti in letteratura e operando una rielaborazione ed organizzazione dei contenuti, si può affermare che i fattori principali che influenzano il top-down cracking, e che verranno trattati singolarmente nel dettaglio, sono i seguenti:

- sforzi e deformazioni prodotti dai carichi di traffico;
- sforzi e deformazioni di natura termica;
- gradienti di rigidità dovuti a temperatura e invecchiamento del conglomerato;
- struttura della pavimentazione stradale;
- proprietà della miscela;
- difetti di costruzione.

### *Sforzi e deformazioni prodotti dai carichi di traffico*

E' ormai chiaro che la causa predominante nella formazione e propagazione della fessurazione da top-down sia rappresentata dal regime di sforzi superficiali dovuto al carico da traffico. Considerando che tale meccanismo fessurativo sia concentrato sulla superficie della pavimentazione e che possa essere inquadrato come un fenomeno locale, la precisa distribuzione degli sforzi agenti sulla pavimentazione riveste un ruolo predominante nella caratterizzazione del problema. Le caratteristiche del carico trasmesso infatti, non riguardano solo l'entità degli sforzi verticali, ma anche la distribuzione degli sforzi orizzontali (in direzione trasversale e in direzione longitudinale) (figura 1.9) che non possono essere trascurati, e che risentono fortemente delle specifiche particolarità costruttive e tecnologiche dello pneumatico (figura 1.10)



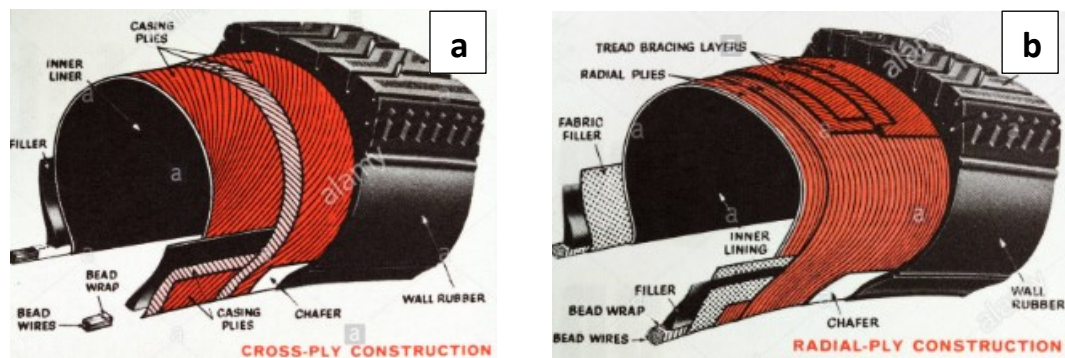
**Figura 1.9:** schematizzazione degli sforzi agenti sulla superficie nelle tre direzioni principali



**Figura 1.10:** diverse tipologie di pneumatici (in particolare, da sinistra 315/80R22.5 gemellata, 295/65R22.5 gemellata, 495/45R22.5, 385/65R22.59)

Negli anni si è assistito, da parte della maggioranza delle compagnie di trasporto, in un cambiamento sostanziale nell'utilizzo della tipologia di pneumatici: in passato infatti risultava predominante l'uso dello pneumatico a tele incrociate (bias ply tire), mentre

nell'ultimo decennio degli anni novanta si è diffuso lo pneumatico di tipo radiale (radial tire), dotato di caratteristiche costruttive notevolmente differenti (figura 1.11). A ciò si aggiunge la tendenza, diffusa dagli anni duemila, e ad oggi ormai predominante, all'utilizzo di uno pneumatico singolo (wide-base tire oppure super-single) in luogo di coppie di ruote gemellate. Tutto ciò ha fortemente influenzato lo sviluppo della fessurazione di tipo top-down poiché la dipendenza delle caratteristiche specifiche dello pneumatico, sulla natura delle sollecitazioni all'interfaccia pneumatico-pavimentazione, è molto marcata.



**Figura 1.11:** caratteristiche costruttive dello pneumatico di tipo radiale (a) e a tele incrociate (b)

A tal riguardo, sono state fondamentali le numerose indagini e successive pubblicazioni di Myers [2,7,8], che attraverso una misurazione diretta degli sforzi trasmessi dallo pneumatico sulla superficie, è stato in grado di mettere per primo in evidenza le notevoli differenze in termini di tensioni all'interfaccia dovuti alle specificità delle diverse tecnologie costruttive di pneumatico presenti in commercio.

In particolare, notevoli variazioni sono state trovate nella distribuzione degli sforzi trasversali prodotti alla base di uno pneumatico a tele incrociate e uno pneumatico radiale: pneumatici radiali, nel dettaglio, inducono significative inversioni di sforzo sotto ciascun tassello del battistrada, originando sforzi di trazione sulla superficie stradale, mentre, al contrario, non sono state misurate inversioni di sforzo nel caso di pneumatici a tele incrociate, eccetto sotto la parte centrale del battistrada (figura 1.12). Si riscontrano difformità anche nell'analisi della distribuzione degli sforzi verticali: i valori più alti, infatti, si individuano in prossimità delle spalle (estremità) degli “bias-ply tires”, mentre, al contrario, si concentrano in prossimità del centro dell'area di carico nel caso di “radial tires” (figura 1.13).

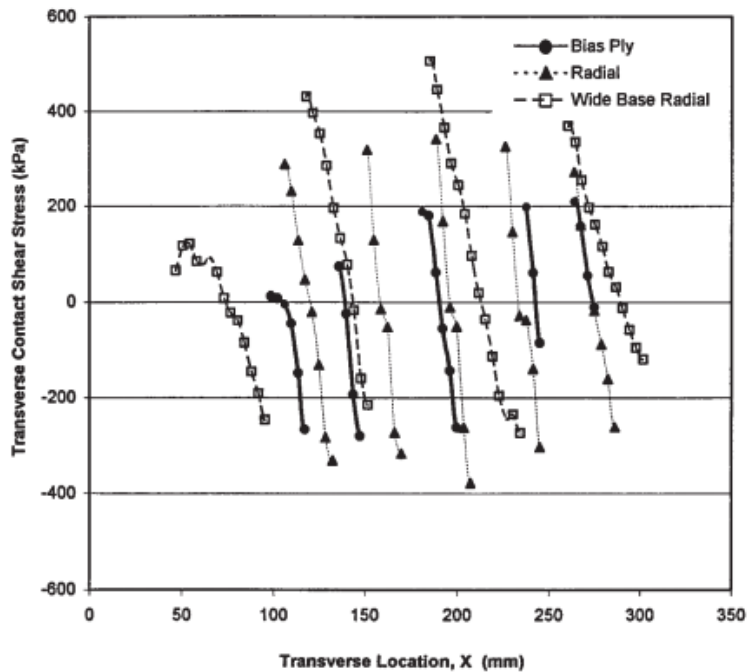


Figura 1.12: valori degli sforzi di contatto trasversali ottenuti da misurazioni dirette

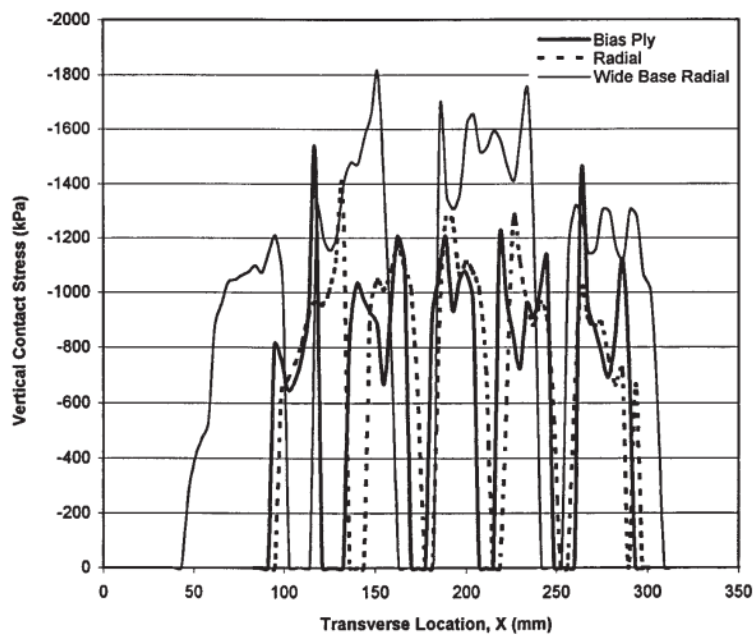


Figura 1.13: valori degli sforzi di contatto verticali ottenuti da misurazioni dirette

Tale profonda diversificazione misurata nella distribuzione degli sforzi all'interfaccia pneumatico-pavimentazione, come già anticipato, è spiegata in modo efficace tenendo in considerazione l'effetto delle caratteristiche strutturali dello pneumatico. Gli pneumatici radiali hanno una struttura della parete laterale più flessibile, mentre una struttura del battistrada più rigido. In tal senso, la differenza nella struttura laterale spiega la differenza

nella distribuzione degli sforzi verticali illustrati in precedenza, dove si metteva in evidenza come i “bias-ply tires” presentassero i valori massimi di sforzo verticale in prossimità delle spalle, mentre il picco nel caso di “radial tires” fosse stato misurato in prossimità della parte centrale del battistrada.

Il diverso comportamento nei riguardi degli sforzi tangenziali è definito invece, dalla differenza nella rigidità del battistrada. La maggiore flessibilità della struttura del battistrada tipico dello pneumatico a tele incrociate permette all’area del battistrada di rigonfiarsi a seguito del gonfiaggio. Tale fenomeno di rigonfiamento si inverte in prossimità del punto di applicazione del carico sulla ruota dove l’area di contatto diviene piatta. Questa inversione produce sforzi trasversali che tendono a spingere la superficie della pavimentazione verso il centro dell’impronta di carico: nell’industria della produzione degli pneumatici tale fenomeno è noto con la denominazione specifica di “effetto pneumatico”. Tale meccanismo è comune a qualsiasi tipologia di pneumatico, compreso gli pneumatici radiali, ma in tale caso, a causa della rigidità della struttura del battistrada, l’effetto pneumatico è minimo. Al contrario, nel caso di “radial tires” risulta predominante l’effetto Poisson, meccanismo di generazione di sforzi tangenziali dovuto all’impedimento, a causa di fenomeni di attrito sulla superficie, della naturale espansione laterale che ciascun tassello del battistrada tende a sviluppare sotto l’effetto di un carico verticale. Sotto ogni singolo tassello dello pneumatico nascono, in questo modo, sforzi laterali che tendono ad applicare un’azione di espansione sulla superficie della pavimentazione. Tale effetto cosiddetto “Poisson” si manifesta sia in pneumatici radiali che a tele incrociate, ma per la presenza predominante dell’effetto pneumatico nei pneumatici “bias-ply”, gli sforzi di trazione derivanti dall’effetto Poisson vengono annullati, fatto eccezione in prossimità del centro dell’area di contatto; al contrario, nel caso di “radial tires”, dove l’effetto pneumatico, come si è già detto, è praticamente trascurabile, gli sforzi di trazione derivanti dal fenomeno di espansione laterale impedita rivestono un ruolo principale nella distribuzione degli sforzi laterali di contatto pneumatico-pavimentazione.

La rappresentazione dei due effetti descritti in precedenza, e la loro composizione schematica, è riportata nella figura seguente, per entrambe le tipologie di pneumatico descritte nel dettaglio in precedenza (figura 1.14).

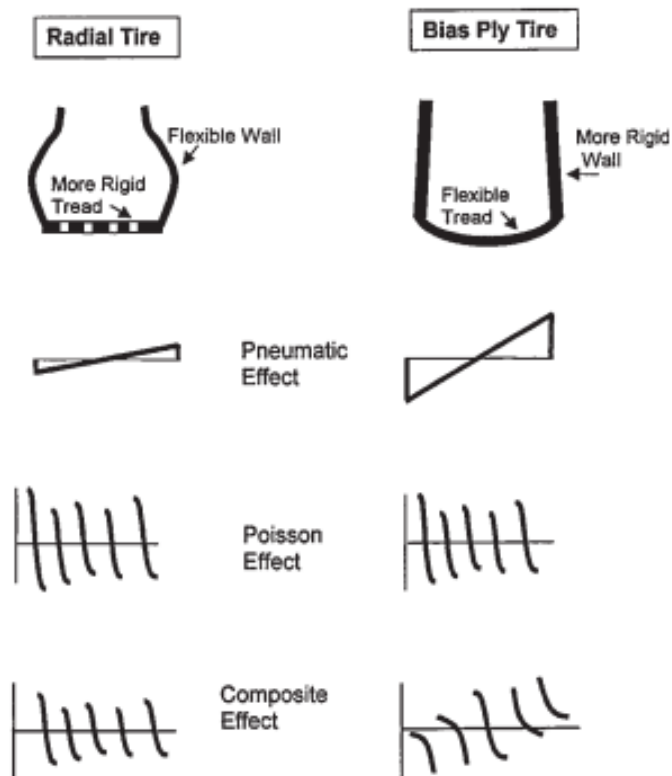


Figura 1.14: schematizzazione della composizione dell'effetto pneumatico e dell'effetto Poisson su pneumatici di tipo radiale (radial tire) e su pneumatici a tele incrociate (bias ply tire)

Di seguito si riportano la distribuzione degli sforzi verticali (figura 1.15 a) e degli sforzi trasversali (figura 1.15 b), al contatto pneumatico-pavimentazione.

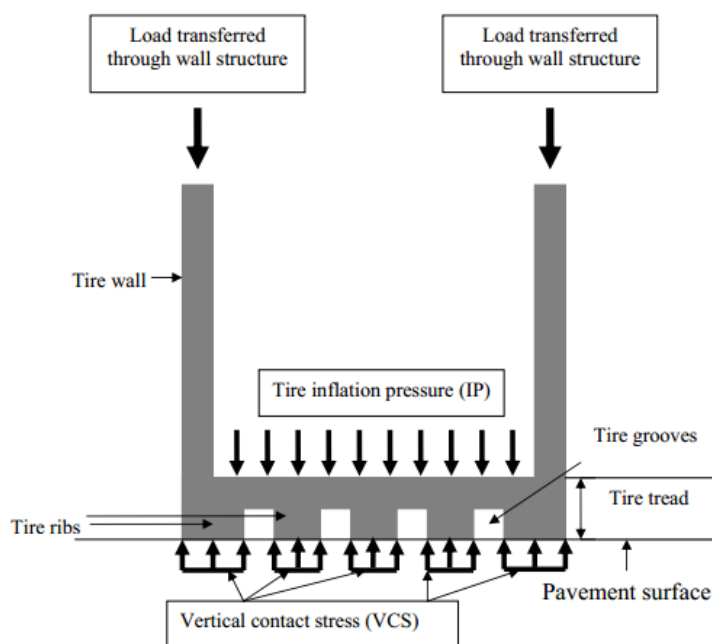


Figura 1.15 a: sforzi verticali di contatto sullo pneumatico



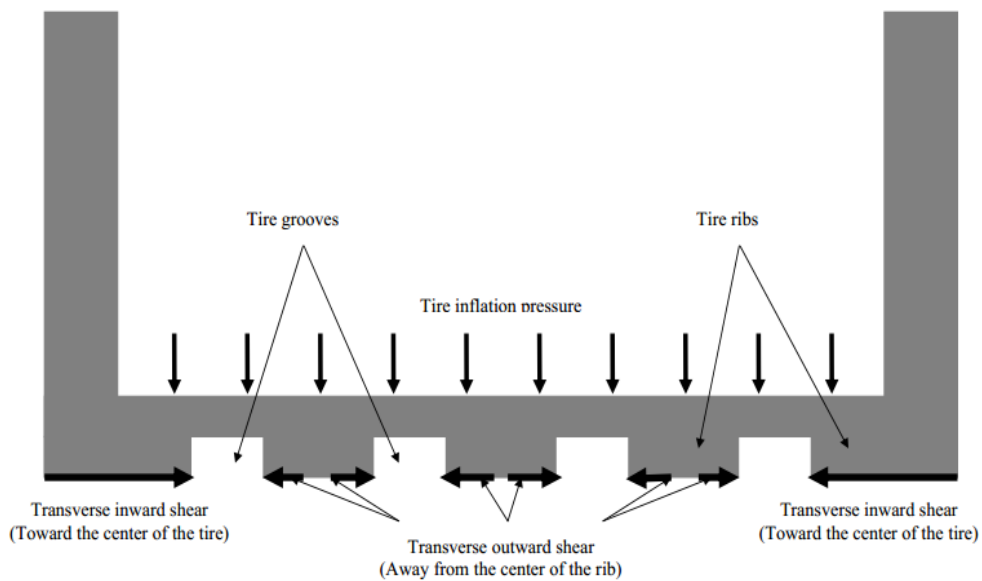


Figura 1.15 b: sforzi trasversali di contatto sullo pneumatico

Dalla valutazione degli sforzi tangenziali nati a seguito della composizione dell'effetto pneumatico e dell'effetto Poisson, si evince come potenzialmente sia possibile l'instaurarsi di un regime di trazione sulla superficie della pavimentazione, sia nel caso di pneumatici radiali che nel caso di pneumatici a tele incrociate. Tuttavia, considerando anche gli sforzi prodotti dal meccanismo di flessione dovuto all'azione del carico verticale, sollecitazioni di trazione appaiono unicamente sotto i tasselli di estremità dello pneumatico radiale (figura 1.16 a). Infatti, la compressione derivante dalla flessione della pavimentazione sotto il carico verticale tende ad eliminare gli effetti degli sforzi tangenziali di interfaccia sotto i singoli tasselli. In tal senso gli sforzi di taglio nello "bias-ply tire" dovuti essenzialmente all'effetto pneumatico, predominante in tale tipo di tecnologia, non producono trazione sugli strati superficiali di conglomerato poiché la compressione indotta dalla flessione verticale annulla tale effetto (figura 1.16 b). Dall'altro canto, la tendenza degli ultimi anni nella costruzione di una pavimentazione dotata di maggiore spessore, che quindi risente meno del meccanismo di flessione, porta ad una concentrazione di sforzi di trazione di maggior intensità in superficie.

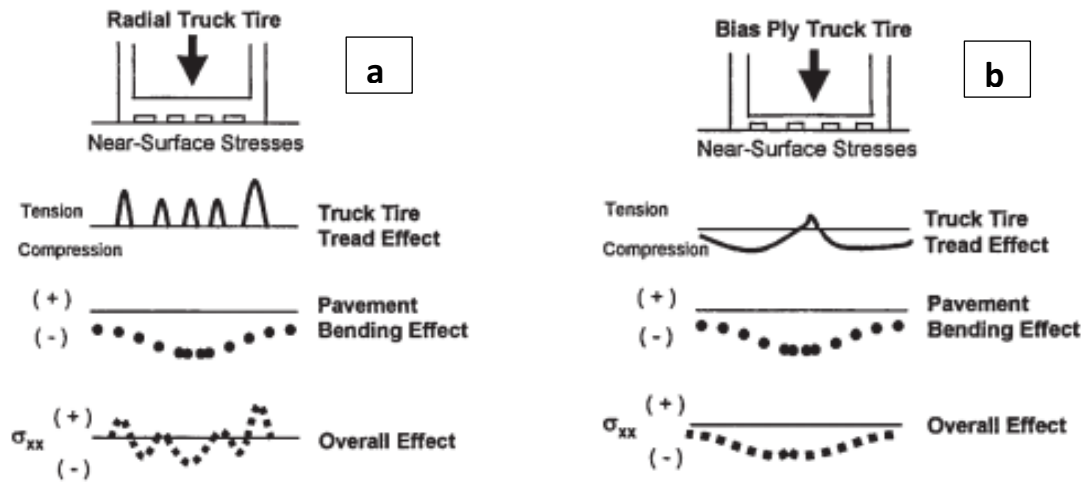


Figura 1.16: effetto del meccanismo di flessione sul regime di sforzi laterali, in un pneumatico di tipo radiale (a) e in un pneumatico a tele incrociate (b)

Attraverso l'uso di un modello basato sul calcolo dell'integrale J [9,10], Lytton ha confermato le osservazioni fatte dalle misure dirette degli sforzi in prossimità dell'area di impronta dello pneumatico, stabilendo come, sebbene gli sforzi in direzione verticale siano i più elevati, anche gli sforzi in direzione trasversale non sono trascurabili per uno studio dettagliato del meccanismo (al contrario gli sforzi in direzione longitudinale sono almeno di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quelli trasversali e possono essere tralasciati) (figura 1.17).

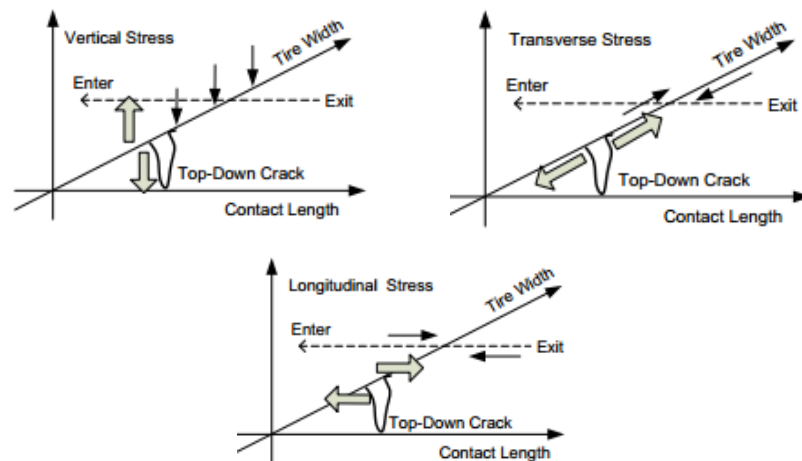


Figura 1.17: direzione degli sforzi superficiali considerati nel modello basato sul calcolo dell'integrale J

Oltre la diversa tecnologia di costruzione degli pneumatici, vi sono diverse altre specifiche che influenzano l'entità e la configurazione degli sforzi sulla superficie della pavimentazione. In particolare, si è visto come tasselli del battistrada più larghi producono

sforzi tangenziali più elevati. Myers, nella sua indagine [7], proponendo una formulazione analitica dell'influenza della larghezza di ciascun tassello sull'entità degli sforzi tangenziali trasmessi, conclude che la sollecitazione di trazione in prossimità di un tassello di 6.25 cm è circa 4 volte maggiore rispetto allo sforzo prodotto in corrispondenza di un tassello più stretto, di larghezza pari a 2.5 cm (la larghezza del tassello, nel dettaglio, influenza il valore del coefficiente medio di attrito e della forza normale, parametri che a loro volta producono una variazione della forza di trazione trasmessa sulla superficie in direzione trasversale) (figura 1.18 a). Tale analisi teorica trova fondamento nei valori di trazione misurati direttamente in corrispondenza dei singoli tasselli del battistrada di uno pneumatico radiale, nell'ambito dello stesso progetto di ricerca, dove la differenza nell'entità dello sforzo, in corrispondenza di ciascun tassello, varia secondo un fattore di 4, tra elemento di estremità più largo e i rimanenti elementi interni più stretti (figura 1.18 b).

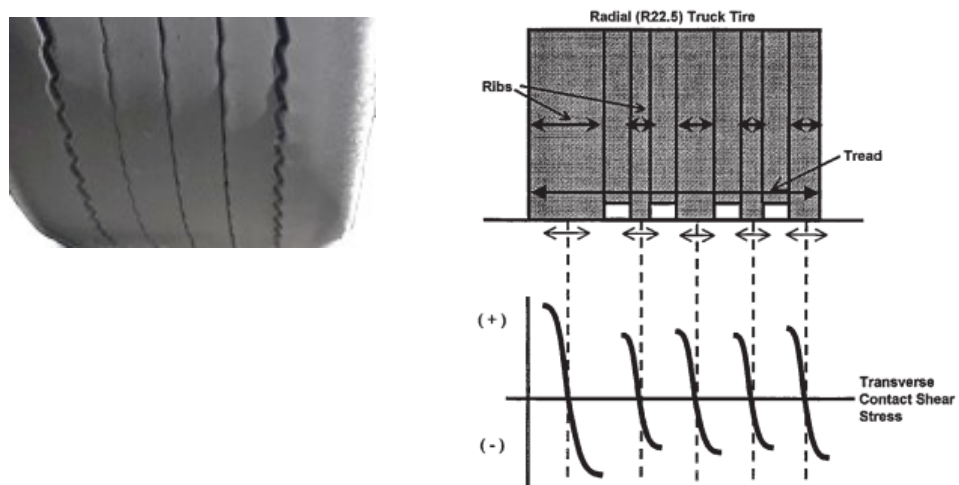


Figura 1.18 a: schematizzazione degli sforzi di contatto in prossimità di ciascun tassello del battistrada

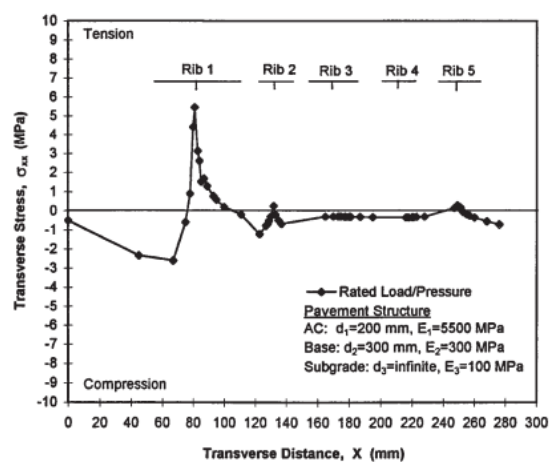
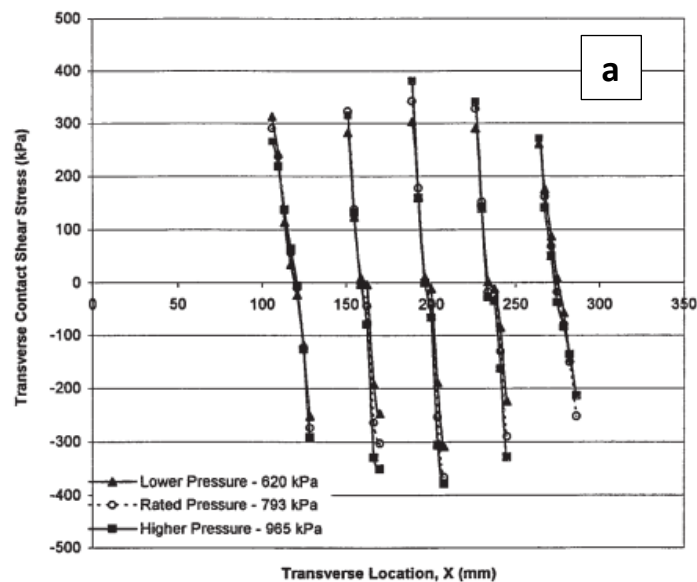


Figura 1.18 b: valori di sforzo sotto ciascun tassello del battistrada misurati direttamente

In aggiunta, si è valutato anche l'effetto della pressione di gonfiaggio e dell'entità del carico sul regime degli sforzi di contatto, soprattutto in merito agli pneumatici radiali, tipologia più utilizzata oggi. Nello specifico, una variazione della pressione di gonfiaggio dello pneumatico radiale in positivo porta ad un incremento degli sforzi trasversali di contatto in corrispondenza della parte centrale del battistrada, ma variazioni trascurabili in corrispondenza delle spalle. Dal momento che, come si è visto in precedenza, gli sforzi tangenziali sono particolarmente critici in prossimità delle estremità del battistrada dello pneumatico, si può concludere che l'effetto di un eventuale incremento della pressione di gonfiaggio sul regime di sforzi trasmessi sulla pavimentazione è relativamente poco significativo, nel caso di "radial tires" (figura 1.19 a). Un incremento dell'entità del carico agente, inoltre, causa un'intensificazione degli sforzi trasversali, mentre al contrario, produce un minimo effetto sull'entità dei valori di sforzo verticale, negli pneumatici radiali (figura 1.19 b). La maggiore flessibilità della struttura laterale dello pneumatico radiale, infatti, permette un allargamento dell'area di contatto proporzionale all'aumento del carico, così che lo sforzo risultante risulta praticamente costante. Al contrario, a causa della diversa struttura laterale dello pneumatico a tele incrociate, dotata di elevata rigidità, l'entità degli sforzi verticali subiscono, in tal caso, un incremento all'aumentare dell'intensità del carico.



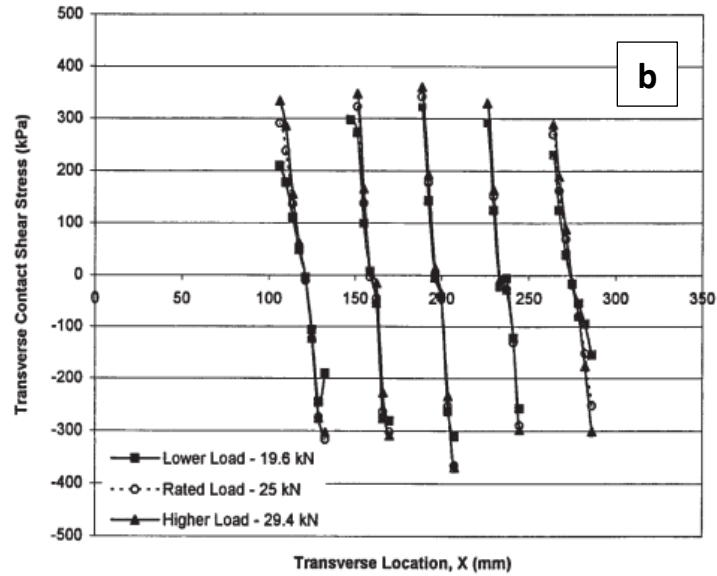


Figura 1.19: influenza della pressione di gonfiaggio (a) e dell'entità del carico agente (b)

Inoltre, la posizione dello pneumatico all'interno della corsia ("traffic wander") risulta cruciale per il trasferimento degli sforzi sulla superficie della pavimentazione, soprattutto in fase di propagazione della fessura. Tramite l'analisi del fattore di intensificazione degli sforzi [5], si è visto come alcune posizioni del carico siano più critiche di altre, anche in dipendenza via via della progressione della fessura in profondità (figura 1.20). Infatti, le posizioni che producono la maggiore intensificazione degli sforzi in una prima fase di innesco della propagazione, dove la profondità della fessura è minima, non sono le medesime di quelle che si configurano come critiche in uno stadio più avanzato nel meccanismo di dissesto, quando la profondità della fessura è notevole (figura 1.21 a-b).

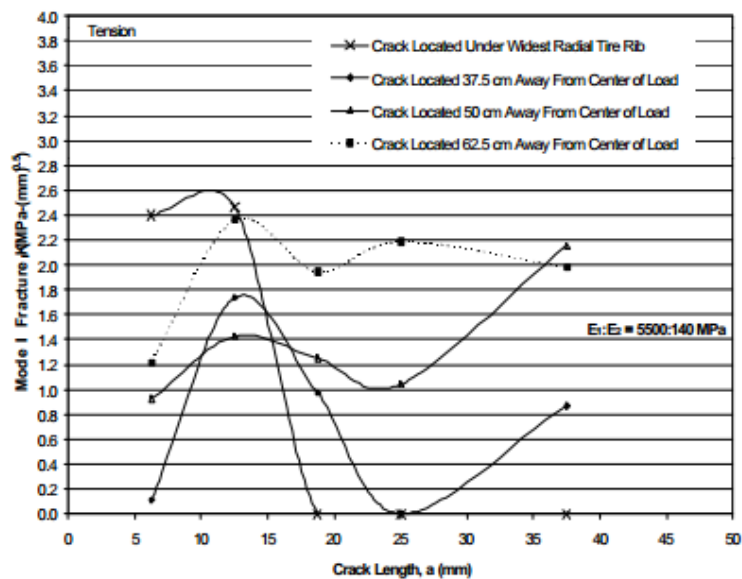


Figura 1.20 : fattore di intensificazione degli sforzi ( $k_1$ ) calcolato per diverse localizzazioni dello pneumatico, al variare della profondità della fessura

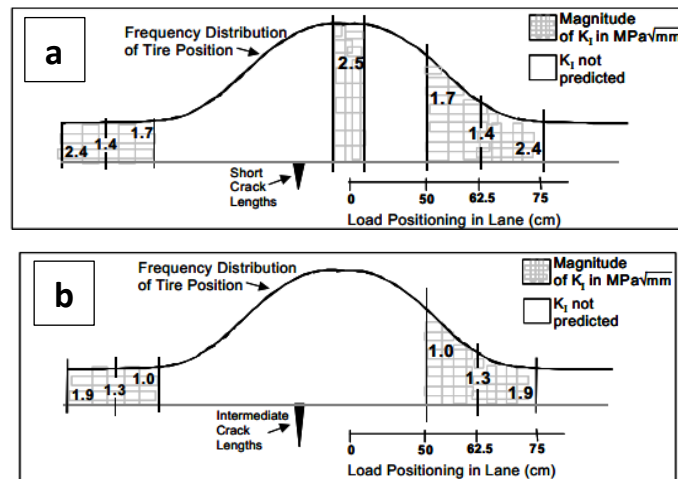


Figura 1.21: distribuzione probabilistica della posizione dello pneumatico e calcolo del fattore di intensificazione degli sforzi ( $k_1$ ) in presenza di una fessura di esigua profondità (a) e fessura di media profondità (b)

Come già anticipato in precedenza, negli ultimi anni si sta assistendo, nell'industria dei trasporti, alla tendenza nell'adozione di uno pneumatico radiale di elevata larghezza ("wide-base radial tire" o "single tire") in luogo dell'utilizzo di una coppia di ruote gemellate ("dual tires"). La scelta di tale tipologia di pneumatico è suggerita da diversi aspetti vantaggiosi, tra i quali [3,11]:

- riduzione della massa dei mezzi pesanti (circa il 2.5% nel caso di rimorchio con due assi);
- incremento delle masse e dei volumi disponibili per il trasporto merci, per il minor ingombro del sistema di pneumatici;
- mancanza di differenze in termini di gonfiaggio e usura degli pneumatici, al contrario di ciò che avviene nel caso di ruote gemellate;
- minor numero di pneumatici da mantenere e stoccare;
- riduzione del coefficiente di resistenza al rotolamento fino al 25%, con conseguente diminuzione nel consumo di carburante fino al 6% per una velocità di 90 Km/h, 12% a 105 Km/h;
- minor impatto ambientale dovuto a riduzione consumo di carburante (in particolare emissioni di ossidi di azoto);
- incremento nella sicurezza e tenuta di strada dovuto al meccanismo degli pneumatici in grado di favorire maggiormente l'azione delle sospensioni;
- riduzione di masse da smaltire e riciclare;

- minor costo di acquisto di uno pneumatico maggiorato rispetto ad una coppia di pneumatici gemellati;
- centro di gravità più basso a cui consegue un livello di guida più confortevole.

Per quanto concerne la valutazione del trasferimento delle sollecitazioni sulla superficie della pavimentazione, gli pneumatici maggiorati (di tipo radiale) producono una distribuzione degli sforzi all'interfaccia, in direzione verticale e in direzione trasversale, molto simile a quella che contraddistingue gli pneumatici radiali standard, ma di maggiore entità. È chiaro quindi che la tendenza diffusa all'adozione di tale tipologia di pneumatico causi uno sviluppo del danno di tipo top-down più accelerato ed esteso.

In tal senso, negli ultimissimi anni duemila, si stanno sviluppando pneumatici maggiorati caratterizzati da notevole larghezza (da 445 mm in su) (chiamati NGWB, new generation of wide-base (tire)) che producono un'area di impronta del carico molto simile, per dimensioni, a quella di una coppia di ruote gemellate, permettendo una migliore distribuzione del carico su una superficie più estesa della pavimentazione (figura 1.22). Si è visto infatti che, nonostante tali pneumatici di nuova generazione producano deformazioni longitudinali maggiori rispetto ad una coppia standard di ruote accoppiate, che si traduce nell'induzione di un maggior livello di danno da bottom-up negli strati legati di base, essi generano sforzi di taglio in superficie simili o addirittura inferiori rispetto ad una classica coppia di ruote gemellate [11]. Tutto ciò rappresenta, in sintesi, un'inversione in positivo del trend osservato nello studio degli pneumatici maggiorati standard, che innescano sforzi di taglio in superficie notevoli, critici per il meccanismo di innesco e propagazione del top-down cracking.

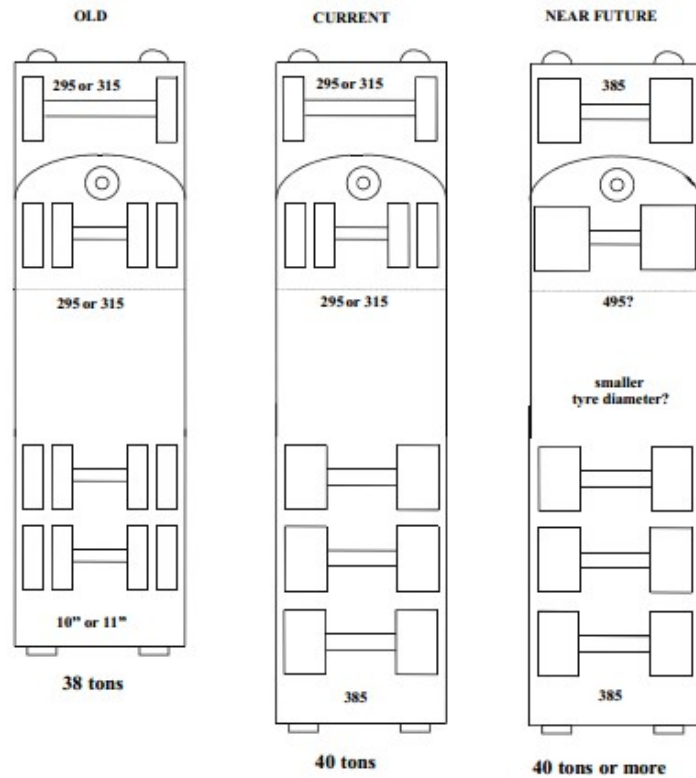


Figura 1.22: evoluzione del sistema di pneumatici utilizzato comunemente nei mezzi pesanti

### *Sforzi e deformazioni di natura termica*

Sebbene la causa principale dell'innescio e della propagazione del meccanismo di fessurazione di tipo top-down sia rappresentata dal regime di sforzi tangenziali instauratosi all'interfaccia pneumatico-pavimentazione per via dei carichi da traffico, anche le sollecitazioni di natura termica possono produrre uno stato di sforzo sulla pavimentazione tale da favorire la progressione del dissesto, configurandosi come causa complementare.

Gli stress termici sono il risultato dell'azione di contrazione degli strati in conglomerato bituminoso dovuti alle basse temperature della pavimentazione e ai meccanismi di attrito prodotti tra strati legati e strati di base [4]. Una formulazione analitica dello sforzo prodotto da una variazione termica può essere la seguente:

$$\Delta\sigma(t, \Delta T) = S(t, \Delta T) * \alpha(\Delta T) * \Delta T$$

dove



- $\Delta\sigma(t, \Delta T)$  è l'incremento dello stress di natura termica in un dato tempo di carico  $t$  e in un intervallo di temperatura  $\Delta T$ ;
- $S(t, \Delta T)$  è il modulo del conglomerato bituminoso in un dato tempo di carico  $t$  e per il valore medio di temperatura all'interno dell'intervallo  $\Delta T$ ;
- $\alpha(\Delta T)$  è il coefficiente termico di contrazione del conglomerato bituminoso in corrispondenza del valore medio di temperatura all'interno dell'intervallo  $\Delta T$ , dipendente anche dalle proprietà volumetriche della miscela.

Il valore della temperatura e le proprietà della miscela influenzano l'entità degli sforzi termici indotti sulla superficie della pavimentazione. Differenze negative di temperatura tra strati legati e strati di base, consistenti soprattutto durante le ore notturne, producono i più alti valori di stress termici sulla pavimentazione.

Dallo studio parametrico del modello VECD [6], basato sul concetto dell'accumulo del micro-danno, elaborato da Kim, si evince che oltre alle variazioni giornaliere di temperatura, anche particolari condizioni climatiche (climi particolarmente freddi o zone soggette a scongelamento primaverile), tendono a mostrare le più alte concentrazioni di aree danneggiate sia in superficie che in profondità negli strati legati (ad esempio il danno procede molto più velocemente in Wyoming (regione fredda) rispetto alla Florida (zona calda)) (figura 1.23). In aggiunta, secondo il medesimo studio, variazioni termiche, soprattutto in climi freddi, oltre a favorire una più alta concentrazione di sforzi sulla pavimentazione, producono una riduzione di efficacia della capacità di auto-riparazione (healing) della miscela.

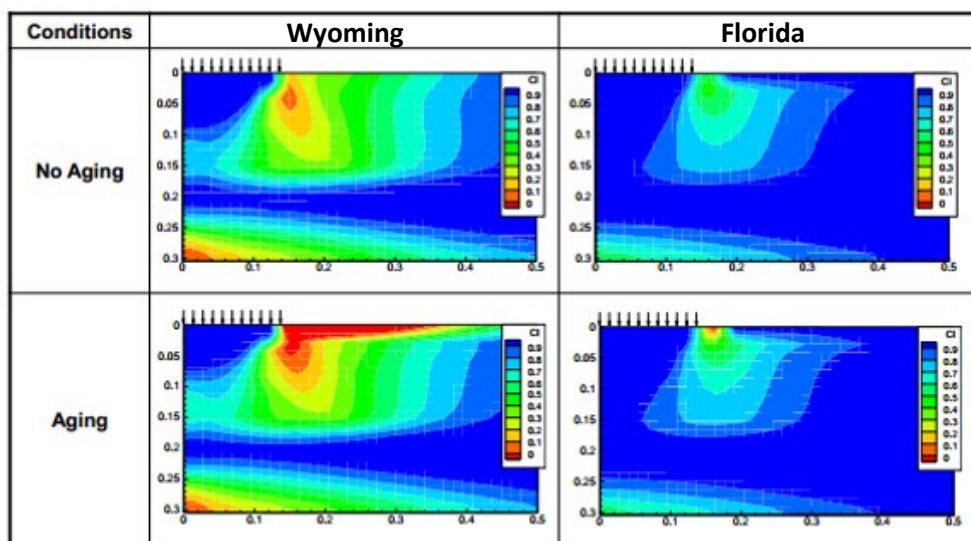
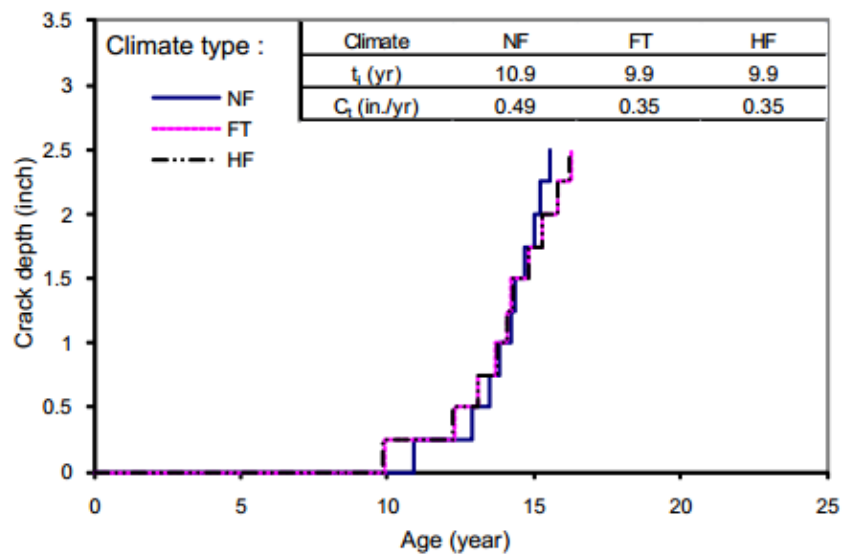


Figura 1.23: concentrazione delle aree danneggiate secondo il VECD model, in una regione fredda (Wyoming) e in una regione calda (Florida)

Fatta eccezione per condizioni climatiche particolari, tuttavia, gli stress di natura termica determinano solo in maniera secondaria il processo di innesco e propagazione del TDC, causato principalmente dal regime di sforzi e deformazioni dovuti ai carichi di traffico. È difficile infatti ipotizzare l'innesco del meccanismo di fessurazione in superficie unicamente prodotto per via di sforzi di contrazione causati da variazioni termiche, in assenza di significativi sforzi tangenziali all'interfaccia pneumatico-pavimentazione dovuti al traffico. In tal senso, nello studio dei parametri del modello HMA-FM [6], basato sulla meccanica della frattura, si evince come gli effetti della temperatura (in termini di sforzi indotti sulla pavimentazione) siano trascurabili rispetto alla quota di danno indotta dal traffico: nei climi più freddi, secondo il modello, si assiste prima all'innesco della fessura, ma la velocità di propagazione è minore (dovuto ad un valore della velocità di deformazione da creep (creep rate) della miscela più elevato); quindi in generale lo sviluppo della fessurazione non sembra essere fortemente influenzato dalle condizioni climatiche del sito (figura 1.24). Le medesime conclusioni vengono confermate nell'elaborazione del modello di calcolo della fessurazione da top-down basato sull'integrale J ai bordi della fessura, sviluppato da Lytton [9,10], dove si riscontra che l'effetto degli stress termici sono trascurabili rispetto all'effetto delle tre tipologie di sforzi prodotti dai carichi di traffico considerati (in direzione verticale, trasversale, longitudinale).



**Figura 1.24:** studio dell'innesco e propagazione del top-down cracking attraverso il modello HMA-FM, in condizioni climatiche differenti

### Gradienti di rigidezza dovuti a temperatura e invecchiamento del conglomerato

Un aumento della rigidezza del conglomerato bituminoso, dovuto a fenomeni di aging e/o fenomeni termici, causa un infragilimento e una riduzione della resistenza a fessurazione della miscela. La propensione all'innesco e alla successiva propagazione del top-down cracking è fortemente legata alla presenza di gradienti di rigidezza all'interno della pavimentazione, che si traducono in uno strato superficiale più rigido per l'effetto più marcato dell'invecchiamento e del clima. Risulta ovvio come la presenza di un'alta percentuale di vuoti nella miscela, a causa di difetti di costruzione o nel caso di tipologie particolari di conglomerato (miscele drenanti), porti ad un ulteriore inasprimento del suddetto fenomeno per via di meccanismi di aging più severi.

Una differenza di rigidezza all'interno degli strati legati (valore del modulo più alto in superficie), dovuta a gradienti di temperatura e aging della miscela, produce un'accelerazione del fenomeno di propagazione del top-down cracking, a causa dell'intensificazione degli sforzi in prossimità della fessura [3]. Nello studio di Myers sui fattori di propagazione del top-down cracking [5], si trova la conferma che la presenza di gradienti di rigidezza contribuisce in modo significativo all'intensificazione degli sforzi sulla superficie in prossimità della fessura, rispetto al caso semplificato di considerare uniformità di rigidezza all'interno della pavimentazione. Il regime degli sforzi sul bordo della fessura può in determinate condizioni raggiungere anche valori doppi rispetto al caso di rigidezza uniforme del multistrato, e varia all'aumentare delle dimensioni in profondità della fessura (figura 1.25).

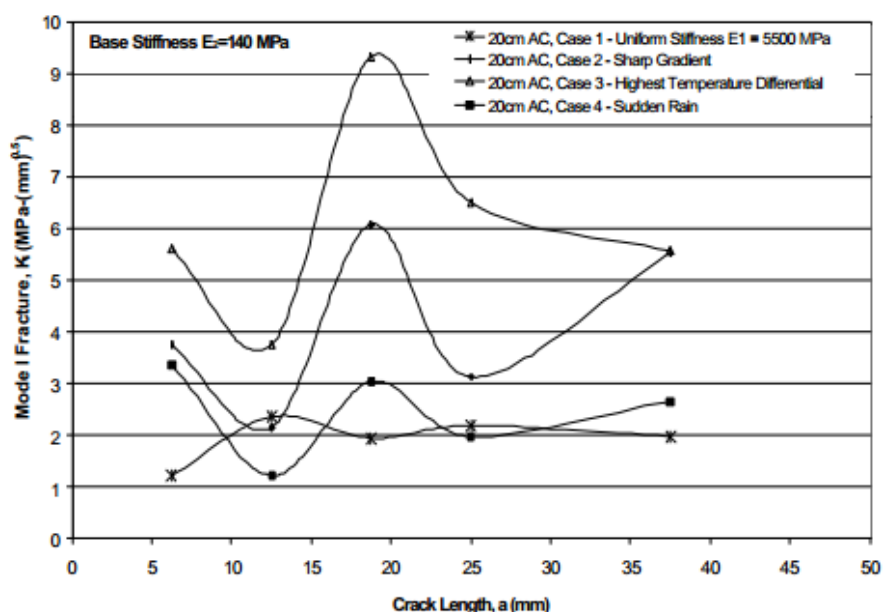


Figura 1.25: fattore di intensificazione degli sforzi ( $k_1$ ) in presenza di diverse situazioni di gradienti di rigidezza, al variare della profondità della fessura

Gradienti di rigidezza hanno inoltre effetti sulla distribuzione dello spettro delle posizioni critiche del carico per la propagazione della fessura. Le localizzazioni dell'impronta di carico (rispetto alla fessura) che risultano essere interessate dai più elevati fenomeni di intensificazione degli sforzi non sono le stesse di quelle individuate considerando il caso di rigidezza uniforme (figura 1.21). In aggiunta, il valore del coefficiente di intensificazione degli sforzi è notevolmente più alto del caso esaminato in precedenza (vedi paragrafo "sforzi e deformazioni dovuti a carichi di traffico"), talvolta pari al doppio. In particolare, tale variazione nei riguardi delle posizioni critiche del carico è evidente nel caso di pavimentazioni dotate di elevato spessore (figura 1.26 a-b); al contrario, nel caso di pavimentazioni di spessore contenuto, a causa dei gradienti di rigidezza, cambiano l'entità degli sforzi, ma le posizioni del carico rispetto alla fessura, in corrispondenza delle quali si hanno i picchi più alti di sforzo, sono pressoché simili. Inoltre, in tutti i casi (anche nel caso di rigidezza uniforme) lo spettro delle posizioni critiche subisce variazioni con la progressione della dimensione della fessura in profondità [5].

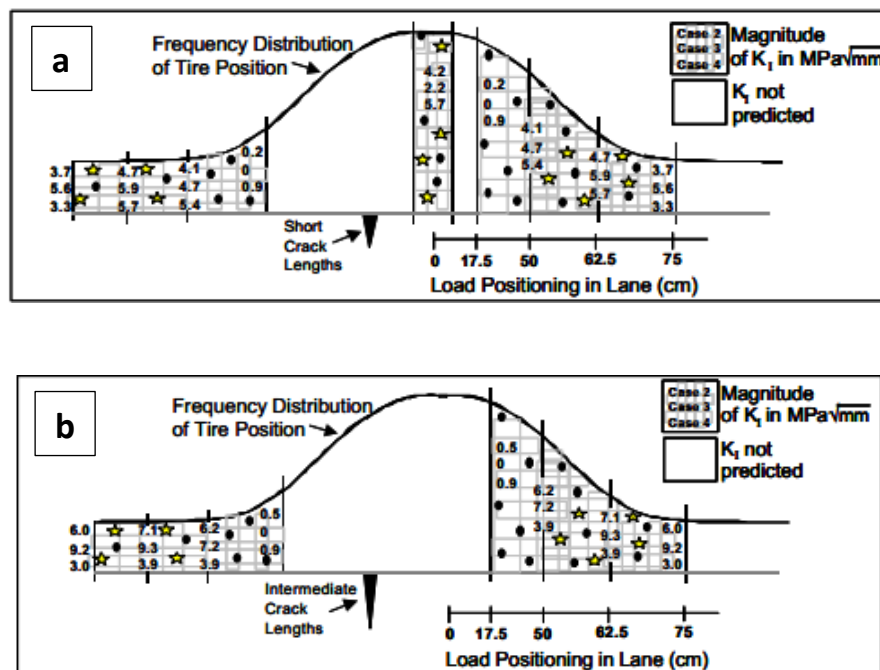


Figura 1.26: spettro delle posizioni di carico critiche rispetto alla fessura di esigua profondità (a) e media profondità (b)

Considerare eventuali gradienti di rigidezza all'interno dello spessore della pavimentazione diviene imprescindibile per una corretta analisi del meccanismo di sviluppo del top-down cracking. Gli effetti dell'aging e del clima risultano infatti determinanti per l'intensificazione

del fenomeno di innesco e propagazione della fessurazione sulla superficie della pavimentazione. Tutti i modelli di previsione di tale tipologia di dissesto infatti, riconoscendo il ruolo principale rivestito dalla non uniformità di rigidità all'interno degli strati legati sullo sviluppo del TDC, tengono conto del fenomeno dell'aging e/o gradienti di temperatura, all'interno dello spessore della pavimentazione. Nel modello HMA-FM [6], l'azione dell'aging è considerata attraverso un parametro nella formulazione dell'energia di frattura, grandezza sulla quale si basa lo sviluppo di tale modellazione (un parametro di aging più elevato corrisponde ad una situazione in cui l'effetto dell'invecchiamento è meno severo e la pendenza della curva dell'energia di frattura è più lieve, cioè la miscela è dotata di maggior resistenza a fessurazione in un determinato tempo  $t$ ) (figura 1.27).

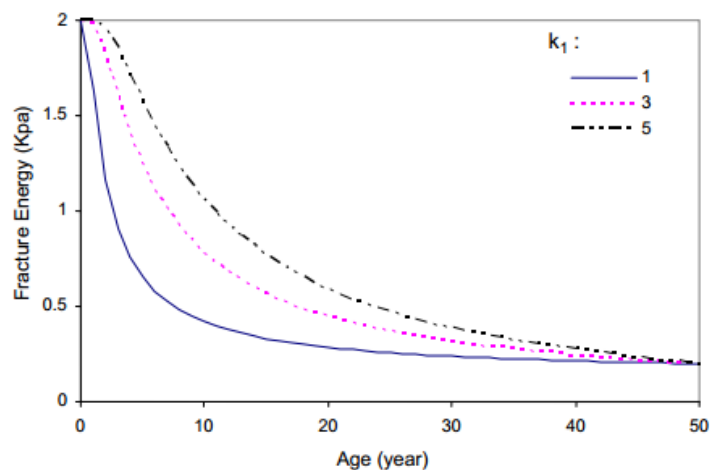


Figura 1.27: energia di frattura al variare del tempo e del parametro di aging

Lytton, all'interno del programma di calcolo della propagazione del TDC, basato sulla determinazione dell'integrale  $J$  [9,10], tiene conto dell'effetto dell'aging e delle variazioni di temperatura attraverso specifici sub-modelli che descrivono l'andamento del valore del modulo, tenendo in considerazione l'evoluzione del fenomeno nel tempo e al variare della profondità della pavimentazione (figura 1.28). Nel modello VECD sviluppato da Kim [6], invece, gli effetti dell'aging vengono tenuti in conto producendo una traslazione (non puramente orizzontale) nella master curve del modulo.

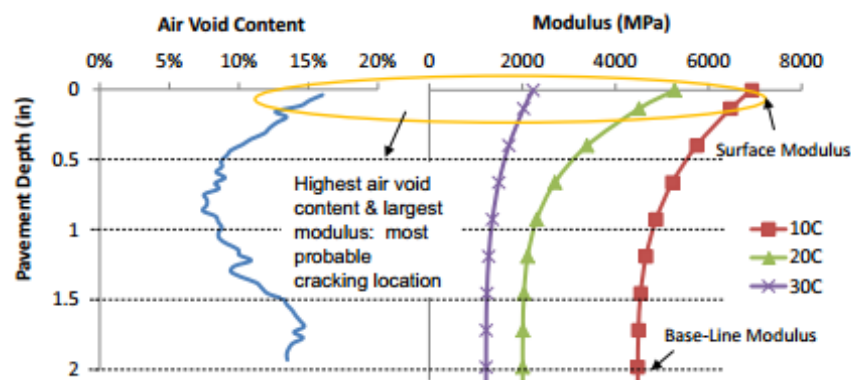


Figura 1.28: valori di rigidità calcolati dal modello al variare della profondità e in tre differenti condizioni climatiche

### *Struttura della pavimentazione stradale*

La dipendenza delle proprietà strutturali del multistrato (spessori e rigidità) nei confronti del meccanismo di sviluppo del top-down cracking è tuttora ancora poco chiara: manca ancora una completa comprensione sulle modalità con le quali la struttura influenzi la fessurazione da top-down; non vi è infatti in letteratura una visione univoca del problema, anzi talvolta diversi autori propongono conclusioni controverse.

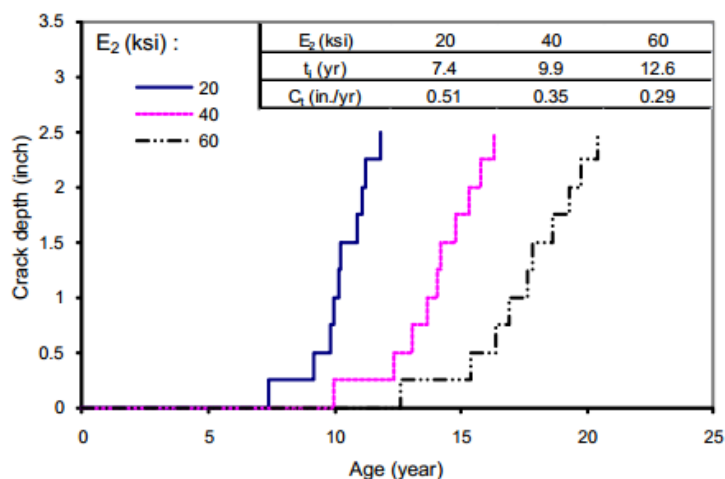
Sebbene alcuni studi affermino che, configurandosi come un fenomeno localizzato sulla superficie della pavimentazione in prossimità dell'impronta di carico, il TDC non sia influenzato significativamente dalle proprietà strutturali della pavimentazione [3], è stato visto che differenze tra la rigidità degli strati legati e degli strati non legati favoriscono significativi sforzi di trazione sulla superficie della pavimentazione [4]. Nel dettaglio, l'entità degli sforzi di trazione subisce un incremento a seguito di:

- un aumento del rapporto tra i moduli degli strati legati superficiali (usura) e degli strati legati di base;
- presenza di una fondazione e/o sottofondo dotato di particolare rigidità (es. strato stabilizzato);
- un incremento nello spessore della sovrastruttura stradale.

Secondo gli studi di Myers e Roque [3,5], il regime di trazione calcolato in prossimità della superficie della pavimentazione non dipende dalla struttura della pavimentazione; tuttavia,

una volta che la fessura si è innescata, il meccanismo di dissesto varia, e intervengono nuovi fattori che ne regolano la propagazione. In sintesi, quindi, le proprietà strutturali non hanno effetti significativi sull'inizio della fessurazione, che è legata al regime di sforzi e deformazioni indotti dai carichi di traffico in prossimità dell'impronta dello pneumatico, mentre influiscono sulla propagazione del meccanismo.

Analisi tramite modelli di calcolo che simulano l'innescò e la propagazione della fessurazione da top-down confermano le conclusioni precedenti. Nell'ambito di uno studio parametrico del modello HMA-FE, si è visto come una pavimentazione dotata di uno strato di fondazione con modulo di rigidezza più elevato manifesti migliori prestazioni nei riguardi della fessurazione (innescò della fessura ritardato e velocità di propagazione meno accentuato): uno strato di base più rigido tende a ridurre gli sforzi di trazione indotti in superficie dal passaggio dei veicoli [6] (figura 1.29).



**Figura 1.29:** propagazione del TDC, secondo il modello HMA-FM, al variare del modulo dello strato di fondazione della pavimentazione

L'analisi dei risultati del modello HMA-FE non suggerisce, al contrario, indicazioni significative in merito all'influenza dello spessore della sovrastruttura sul fenomeno di dissesto: come suggerito dagli stessi autori, sebbene il modello di calcolo indichi che pavimentazioni di elevato spessore manifestino prestazioni migliori, tale risultato è controverso poiché l'intera previsione del modello si basa sul meccanismo di flessione degli strati, che risulta non appropriato per strati di grande spessore, dove sono predominanti fenomeni di sforzi tangenziali in superficie [6].

Lo studio del modello VECD di Kim [6,12], alla stessa maniera, suggerisce come una bassa rigidezza degli strati di sottofondo abbia un'influenza negativa in particolare sulle

pavimentazioni di lieve spessore, ma produce un maggiore accumulo del danno in superficie, soprattutto in presenza di pavimentazioni spesse. Pavimentazioni caratterizzate da strati legati di notevole spessore producono una diminuzione della velocità di propagazione del danno, ma una maggiore concentrazione delle zone danneggiate in superficie: è chiaro quindi come la propensione al top-down cracking aumenti in presenza di strati legati rigidi (o di notevole spessore) e strati di fondazione e/o sottofondo dotati di esigua rigidità.

Secondo uno studio sulla valutazione dell'influenza dello spessore e della rigidità degli strati nella propagazione del top-down cracking [13], attuato calcolando il regime di tensioni e deformazioni sulla superficie e in profondità nel multistrato, tramite il software BISAR, sopra un dato spessore della pavimentazione il fenomeno del top-down, e non il bottom-up cracking, è il meccanismo di rottura per fatica dominante. In particolare il valore dello spessore dello strato, sopra il quale il TDC diviene predominante, dipende dalla rigidità dello strato di fondazione e dal modulo degli strati legati: aumentando il modulo di rigidità degli strati in conglomerato bituminoso, anche lo spessore sopra il quale il meccanismo da top-down diviene prevalente subisce un incremento, mentre, al contrario, un aumento della rigidità dello strato di fondazione causa un decremento dello spessore critico sopra il quale si manifesta in maniera preponderante una fessurazione da top-down. Inoltre, in presenza di uno strato di usura caratterizzato da una rigidità inferiore rispetto agli strati legati più profondi (situazione che si verifica sicuramente nel caso di strato di usura drenante), la propensione all'innescarsi del TDC aumenta in modo netto (rispetto ad una fessurazione da bottom-up), indipendentemente dai valori di rigidità dello strato di fondazione e degli strati in conglomerato.

### *Proprietà della miscela*

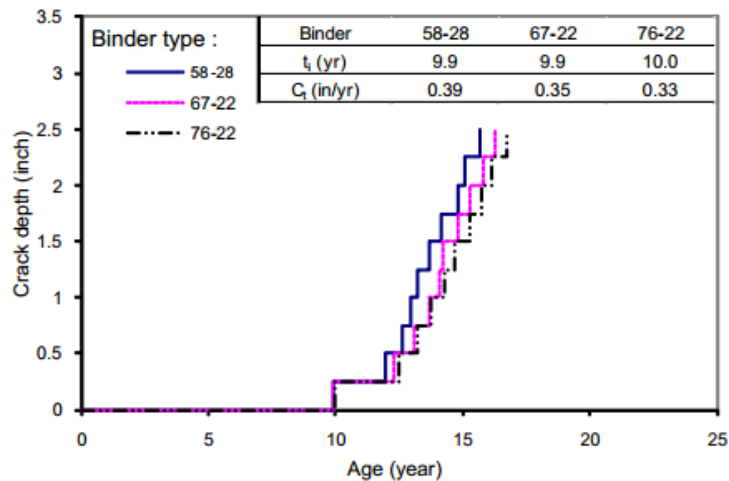
Le proprietà della miscela influenzano più o meno marcatamente la tendenza allo sviluppo della fessurazione di tipo top-down, poiché condizionano in modo determinante la resistenza a fessurazione del conglomerato bituminoso. Sebbene i valori di resistenza ottenuti dalla prova a trazione indiretta, non siano direttamente correlabili, in maniera esplicita, con le prestazioni della miscela nei riguardi del top-down cracking, i parametri che influenzano la resistenza a trazione sono i medesimi che qualitativamente risultano rilevanti per il comportamento del conglomerato nei confronti della fessurazione da top-down [3]:



- percentuale di vuoti;
- viscosità del bitume;
- quantità di legante;
- utilizzo di bitume modificato;
- utilizzo di bitume riciclato (RAP e/o RAS);
- granulometria e angolarità degli aggregati.

Il tenore di vuoti contenuti nel conglomerato bituminoso si configura come il parametro della miscela che più risulta determinante nello sviluppo del meccanismo del top-down cracking. La propensione alla fessurazione è marcatamente incrementata con l'aumento dei vuoti per via di fenomeni più severi di invecchiamento del conglomerato e per via di una diminuzione della resistenza alla fessurazione. In tal senso, tale situazione viene chiaramente esasperata in presenza di miscele drenanti [3,4,9,10,14]. L'impiego di miscele porose interessa oggi giorno la stragrande maggioranza della rete autostradale italiana; i motivi sono riconducibili al miglioramento, grazie ad una percentuale di vuoti compresa tra il 15% ed il 25%, delle condizioni di sicurezza in condizioni di strada bagnata per effetto della riduzione del rischio di aquaplaning e dei fenomeni di splash & spray causati dagli pneumatici. Tuttavia l'elevata percentuale di vuoti in tali tipologie di pavimentazione è responsabile di una minore durabilità rispetto alle miscele di conglomerato chiuso tradizionali, a causa di una maggiore esposizione agli agenti atmosferici ed alle radiazioni UV, responsabili di un invecchiamento accelerato. Inoltre esse sono caratterizzate da valori di resistenza a fessurazione considerevolmente inferiori (valori di fracture energy FE e di dissipated creep strain energy DCSE minori rispetto a quelli tipicamente registrati nel caso di miscele chiuse). Ciononostante, nel caso di pavimentazioni dotate di strati di usura drenanti, le miscele porose rappresentano il primo fronte che si oppone allo sviluppo del fenomeno di top down cracking: il monitoraggio di tronchi sperimentali in esercizio ha evidenziato chiaramente come la resistenza nei confronti della fessurazione superficiale dipenda dalla qualità delle miscele porose e dalle caratteristiche dell'interfaccia con lo strato portante sottostante. In particolare si è visto come l'applicazione di una mano d'attacco caratterizzata da un elevato dosaggio di emulsione modificata (bitume residuo 0.5-0.8 Kg/m<sup>2</sup>) rallenti in maniera considerevole il meccanismo di rottura di tipo top-down, a cui le pavimentazioni drenanti sono particolarmente soggette poiché è stato verificato che elevati dosaggi consentono di sigillare lo strato portante sottostante e di aumentare il contenuto di legante dello strato poroso saturandone i vuoti in prossimità dell'interfaccia [15,16,17].

Un incremento della viscosità del legante produce un miglioramento della resistenza a trazione del conglomerato [3], ma secondo lo studio parametrico del modello HMA-FM, una variazione di viscosità influisce solo in maniera leggera sullo sviluppo del top-down cracking. In particolare, il tempo di innesco della fessurazione non è in alcun modo affetto dalla classe del legante, mentre l'utilizzo di un bitume più soffice si traduce in una velocità di propagazione del meccanismo di rottura più contenuta, dovuta ad una capacità di rilassamento della miscela più sviluppata. D'altro canto, però, la rigidità del legante influenza anche la rigidità del conglomerato così che un bitume più soffice produce una miscela dotata di rigidità più bassa, e tale aspetto potrebbe annullare completamente l'azione positiva dovuta ad una migliore capacità di rilassamento, descritta in precedenza (figura 1.30) [3,6].



**Figura 1.30:** innesco e propagazione del TDC, secondo il modello HMA-FM, al variare della classe di legante

Inoltre, un aumento nel quantitativo di legante nella miscela produce un incremento nel numero di cicli necessari per rompere a fatica il conglomerato, mentre ne riduce la rigidità [4]. In aggiunta, l'utilizzo di bitume modificato con aggiunte polimeriche determina una migliore resistenza a fessurazione [14]. Da uno studio dettagliato per mezzo del modello VECD basato sull'accumulo del micro-danno, Kim conclude che miscele con SBS (stirene-butadiene-stirene) presentano una minore velocità di accumulo del danno soprattutto nel periodo estivo, quando il bitume modificato manifesta un modulo di rigidità più basso e un comportamento maggiormente visco-plastico rispetto al conglomerato di riferimento [6]. Per concludere, alti quantitativi di RAP (recycled asphalt pavement) nella miscela e/o l'aggiunta di RAS (recycled asphalt shingle) riducono la capacità della miscela di

accumulare deformazioni senza danneggiarsi, e quindi causano una minore resistenza a fessurazione (il conglomerato diviene più rigido e fragile).

### *Difetti di costruzione*

Difetti dovuti a pratiche errate di costruzione, che causano una compattazione non sufficiente o segregazione nella miscela, inducono una propensione assai più netta allo sviluppo della fessurazione da top-down nel conglomerato in sito. Tali difetti di costruzione generano variazioni in negativo delle proprietà volumetriche della miscela: un aumento del tenore di vuoti all'interno dello strato, una diminuzione della percentuale del contenuto di legante, presenza di un maggior numero di punti critici favorevoli all'innescò della fessurazione. Una segregazione all'interno del conglomerato può avvenire durante le fasi di produzione, trasporto oppure stesa in sito e causa una riduzione della resistenza a trazione della miscela e diminuzione della durabilità del conglomerato [3,4].

Si è visto in particolare che il fenomeno di top-down cracking, sviluppatosi in prossimità di aree affette da segregazione della miscela, presenta caratteristiche di sviluppo specifiche ed è determinato da cause differenti. Nelle aree segregate il danno dovuto a infiltrazione di acqua causa una riduzione di circa il 32% della resistenza a trazione, mentre l'azione di segregazione, singolarmente, produce una diminuzione del 15% di tale resistenza: in conclusione, segregazione e infiltrazione, causano nelle aree segregate, una variazione in negativo pari al 42% circa nel valore di resistenza a trazione, che si configura come la causa principale del fenomeno di TDC in presenza di aree segregate [3].

Altri difetti puntuali sulla superficie della pavimentazione, dovuti a diverse pratiche errate durante la fase di costruzione della pavimentazione, offrono punti di innescò preferenziali per lo sviluppo della fessurazione da top-down.

## **1.5 Modelli di innescò e propagazione del top-down cracking**

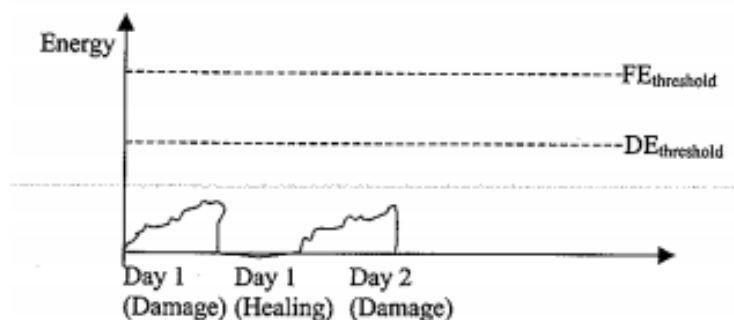
Risultati di modellazioni avanzate indicano chiaramente la necessità di considerare approcci alternativi nello studio del TDC rispetto a quelli tipicamente adottati per determinare il comportamento di una pavimentazione nei confronti della tradizionale fatica da bottom-up, indotta per flessione. È appurato che le discontinuità presenti sulla superficie stradale

evolvono durante la vita utile comportando una marcata amplificazione delle tensioni. Infatti gli sforzi tangenziali superficiali al di sotto degli pneumatici radiali, lo sviluppo di zone danneggiate, la presenza di gradienti di rigidità possono alterare significativamente la distribuzione dello stato tensionale nella pavimentazione. Ciò implica che l'innescò e la propagazione delle fessure è fortemente influenzata da fenomeni locali di concentrazione degli sforzi causata dalla combinazione di molteplici fattori. Nelle sezioni seguenti si presenteranno due diversi modelli di propagazione della fessurazione da TDC:

- il modello HMA-FM (Hot Mix Asphalt – Fracture Mechanics), basato sulla teoria della meccanica della frattura viscoelastica;
- il modello sviluppato dagli studi di Lytton, basato sulla legge di fatica di Paris e sul calcolo dell'integrale J.

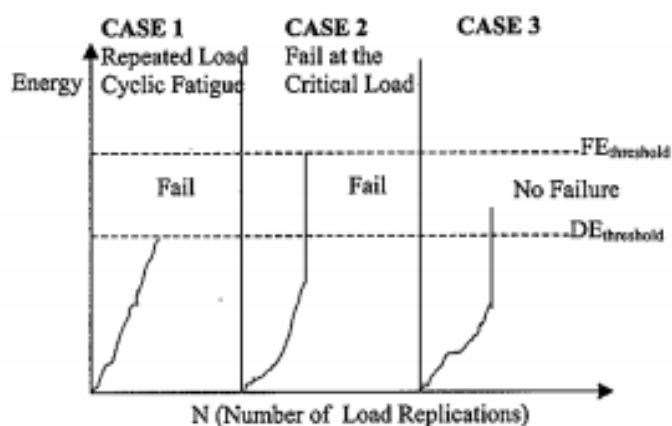
#### *HMA-FM (Hot Mix Asphalt – Fracture Mechanics)*

In generale, il modello HMA-FM considera l'effetto delle macro-fessure durante la propagazione della fessurazione. Fondamentalmente il modello si basa sul concetto generale di soglia energetica, superata la quale si ha l'innescò della cricca. Tale concetto è basato sulla considerazione che micro-danni (danni non associati all'innescò o alla propagazione della fessurazione) risultano essere completamente reversibili per via dei fenomeni di auto-riparazione (healing) del conglomerato, mentre macro-danni (danni associati all'innescò o alla propagazione della fessurazione) non sono completamente reversibili. Da ciò, nasce il concetto di soglia, che definisce lo sviluppo di una macro-fessura, in qualsiasi tempo "t", sia in fase di innescò che in fase di propagazione, in qualsiasi punto della miscela. Come mostrato in figura, se le condizioni di carico e di healing sono tali che l'energia indotta non superi la soglia energetica della miscela, il conglomerato non arriverà mai a fessurazione per trasmissione dei carichi di traffico (figura 1.31). La definizione è in diretto contrasto con la classica teoria della fatica, che descrive la fessurazione come un continuo accumulo del danno all'aumentare del numero di passaggi di carichi sulla pavimentazione [18,19].



**Figura 1.31:** condizioni di carico che non generano danno nella pavimentazione, poiché non superano la soglia energetica fissata

Nel dettaglio, si possono definire due diverse soglie energetiche in base a due diverse tipologie di innesco e propagazione della fessura. Nel primo caso, un carico ripetuto in modo continuo, il quale produce sollecitazioni inferiori alla resistenza a trazione della miscela, può causare la frattura se la velocità di accumulo del danno, durante il periodo di carico, supera la velocità di auto-riparazione della miscela (figura 1.32 - caso 1). La soglia energetica associata a questo tipo di sviluppo del dissesto è inferiore rispetto alla soglia correlata al secondo tipo di innesco. Nel secondo caso, infatti, la fessurazione avviene se un singolo carico eccede la soglia energetica richiesta per arrivare alla frattura per mezzo di una singola applicazione del carico (figura 1.32 - caso 2). Tale limite è infatti differente rispetto a quello a cui si è fatto riferimento nella prima tipologia, ed è di entità maggiore: il conglomerato, secondo tale teoria, non arriverà mai ad una situazione di fessurazione attraverso l'applicazione di un carico singolo se il limite energetico superiore non viene superato, anche nel caso la soglia energetica inferiore (descritta nel primo caso) venga ecceduta (figura 1.32 - caso 3) [18].



**Figura 1.32:** tipologie di innesco della fessurazione da top-down correlate a due diverse soglie energetiche

Nello specifico, le due tipologie di soglie energetiche, associate alle due varianti di applicazione del carico sulla pavimentazione, secondo il modello HMA-FM, corrispondono al “dissipated creep strain energy limit” (DCSElim), nel primo caso (soglia energetica inferiore), e al “fracture energy limit” (FElim), nel secondo caso (soglia energetica superiore). Questi parametri sono determinabili attraverso una prova a trazione indiretta, in cui è possibile misurare anche la grandezza del modulo resiliente (necessario per determinare la parte di energia elastica): il “fracture energy limit” rappresenta l’area sottesa alla curva sforzo-deformazione, mentre il “dissipated creep strain energy limit” è la differenza tra il “fracture energy limit” e la quota di energia elastica (figura 1.33).

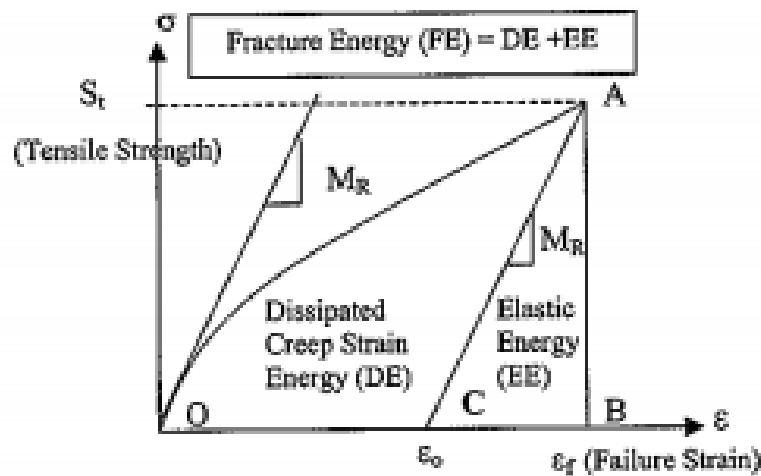


Figura 1.33: curva sforzo-deformazione in cui si vede il significato fisico del FElim e del DCSElim

Il modello propone una formulazione analitica del “DCSE limit” e del “FE limit”, caratterizzata da un’evoluzione nel tempo (le soglie energetiche infatti subiscono un decremento, raggiungendo un valore minimo (figura 1.34)) [6,18,19,20,21]. Di seguito, in ordine, si riportano le espressioni dell’energia di frattura limite riferita alla superficie della pavimentazione, dell’energia di frattura limite ad una profondità generica, e del “dissipated creep strain energy” ad una profondità generica:

$$FE_{lim}(t) = FE_i - (FE_i - FE_{min}) \cdot [S_n(t)]^{K_1}$$

$$FE_{lim}(t, z) = FE_i - [FE_i - FE_{lim}(t)] \cdot S(t, z)/S(t)$$

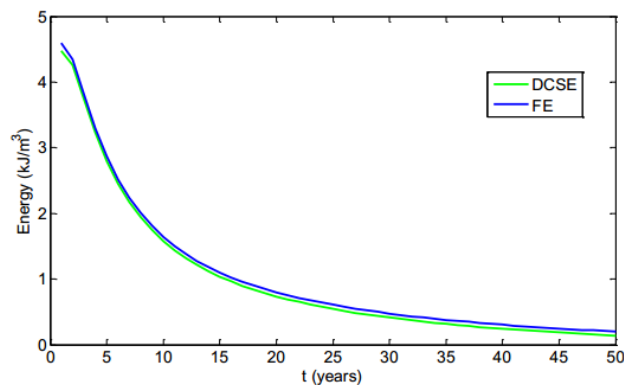
$$DCSE_{lim}(t, z) = FE_{lim}(t) - [S_t(t, z)]^2/[2 \cdot S(t, z)]$$

dove:

- $FE_{lim}(t)$  è l'energia di frattura limite sulla superficie del conglomerato bituminoso al tempo  $t$ ;
- $FE_i$  è l'energia di frattura iniziale della miscela appena stesa in sito;
- $FE_{min}$  è l'energia di frattura che possiede la miscela in un tempo "t" infinito (si considera uguale a  $FE_{lim}(50 \text{ anni}) = 0.2 \text{ KJ/m}^3$ );
- $S_n(t)$  è la variazione normalizzata di rigidezza sulla superficie del conglomerato bituminoso e risulta:

$$S_n(t) = \frac{S(t) - S_0}{S_{max} - S_0}$$

- $K_1$  è il parametro indice dello stato di invecchiamento della miscela, determinabile con prove a trazione indiretta;
- $S(t)$  è la rigidezza del conglomerato bituminoso in superficie al tempo  $t$ ;
- $S_0$  è la rigidezza  $S(t)$  al tempo  $t=0$
- $S_{max}$  è la rigidezza  $S(t)$  al tempo  $t=50$  anni
- $FE_{lim}(t, z)$  è l'energia di frattura limite al tempo  $t$  e alla profondità generica  $z$ ;
- $S(t, z)$  è l'espressione generale della rigidezza del conglomerato bituminoso;
- $DCSE_{lim}(t, z)$  è il dissipated creep strain energy limit al tempo  $t$  e alla profondità generica  $z$ ;
- $S_t(t, z)$  è l'espressione generale della resistenza a trazione del conglomerato bituminoso.



$$FE = DCSE + EE \text{ (Elastic Energy)}$$

Figura 1.34: andamento nel tempo del FELim e del DCSElim

Per lo studio della propagazione della fessura, sono stati elaborati sub-modelli che descrivono la rigidezza del conglomerato al variare del tempo e della profondità dello strato, la resistenza a trazione del conglomerato in un dato tempo  $t$  e in una generica profondità  $z$ . Inoltre, si tiene conto della capacità di auto-riparazione della miscela (healing) e dell'invecchiamento del conglomerato (vedi parametro  $k_1$  descritto in precedenza) [6,20,21]. Vengono riportate, di seguito, le formulazioni utilizzate dal modello, per la rigidezza della miscela, la resistenza a trazione e la capacità di auto-riparazione del conglomerato:

$$|E^*|_t = |E^*|_0 \cdot \frac{\log \eta_t}{\log \eta_0}$$

dove:

- $|E^*|_t$  rappresenta la rigidezza della miscela dopo invecchiamento (figura 1.35);
- $|E^*|_0$  rappresenta la rigidezza della miscela non invecchiata;
- $\eta_t$  è la viscosità del bitume dopo invecchiamento;
- $\eta_0$  è la viscosità del bitume senza invecchiamento.

I valori di viscosità  $\eta_0$  e  $\eta_t$  possono essere determinati mediante il modello GAM (Global Aging Model), che fornisce i valori di viscosità in un dato tempo  $t$  e profondità  $z$ , in dipendenza di parametri riguardanti le proprietà volumetriche della miscela (per maggiori dettagli si invita a consultare i documenti citati in bibliografia).

Inoltre,  $|E^*|_0$  è espressa tramite un'espressione dipendente dalle proprietà volumetriche della miscela ed è riferito ad un tempo di carico pari a 0.1 s

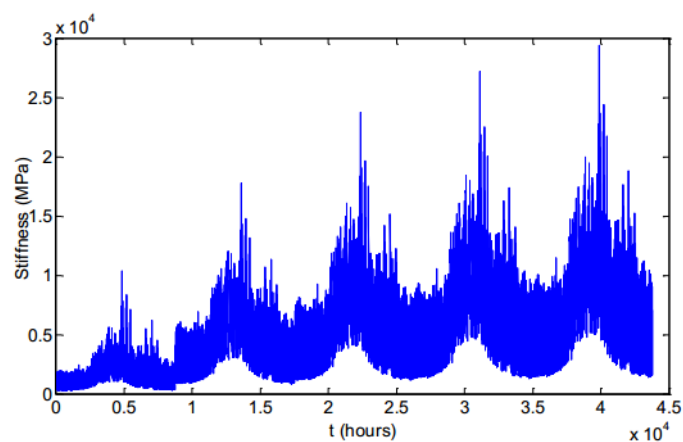


Figura 1.35: andamento della rigidezza al variare del tempo, secondo il HMA-FM model



$$S_t = \sum_{n=0}^5 a_n \cdot (\log S_f)^n$$

dove:

- $S_t$  è la resistenza a trazione della miscela (figura 1.36);
- $S_f$  è la rigidità del conglomerato ad un tempo di carico di 1800 s che può essere ottenuta dall'espressione della rigidità della miscela applicando un fattore riduttivo;
- $a_n$  sono costanti e presentano i valori:  $a_0 = 284.01$ ,  $a_1 = -330.02$ ,  $a_2 = 151.02$ ,  $a_3 = -34.03$ ,  $a_4 = 3.7786$ ,  $a_5 = -0.1652$

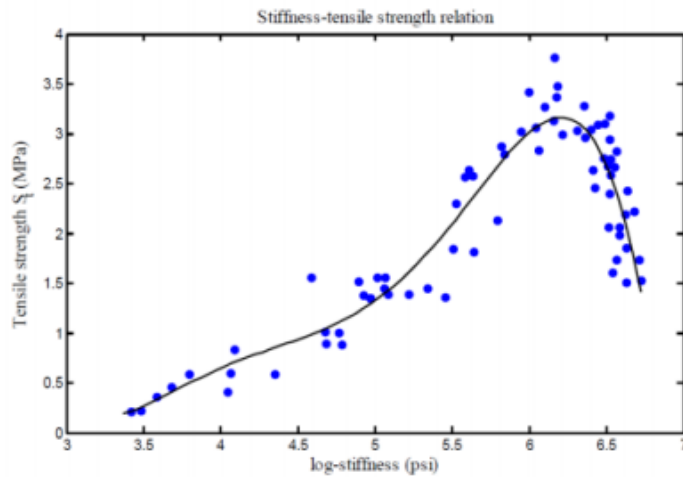


Figura 1.36: andamento della resistenza a trazione della miscela al variare della rigidità del conglomerato

$$h_{ym}(t) = 1 - [S_n(t)]^{FEi/1.67}$$

dove:

- $h_{ym}(t)$  è la capacità di autoriparazione della miscela al tempo t

Considerando opportunamente l'effetto aging del conglomerato bituminoso in prossimità della superficie della pavimentazione stradale, si assiste ad un incremento di rigidità, ad una riduzione nell'energia di frattura (infragilimento) e ad un decremento della capacità di healing.

Se da un lato il modello si basa sulla formulazione della soglia energetica di danno dipendente dalle caratteristiche della miscela e dalle condizioni ambientali, dall'altro lato vi

è la descrizione del danno indotto sulla pavimentazione, diviso in due tipologie (danno indotto dai carichi di traffico e danno indotto da sforzi trasversali superficiali di natura termica) [6,18,19,20,21]:

$$\frac{DCSE_L}{cycle} = \int_0^{0.1} \sigma_{AVE} \sin(10\pi t) \dot{\epsilon}_{pmax} \sin(10\pi t) dt$$

dove:

- $\frac{DCSE_L}{cycle}$  è il danno indotto sulla pavimentazione dai carichi di traffico per ogni ciclo di carico;
- $\sigma_{AVE}$  è lo sforzo medio di trazione indotto sulla superficie della pavimentazione dai carichi veicolari, calcolato tramite un'analisi 3D lineare elastica (LEA) considerando un'impronta di carico circolare (figura 1.37);
- $\dot{\epsilon}_{pmax}$  è il creep strain rate, la cui formulazione deriva dal massimo valore determinabile in una prova di creep di 1000 s:

$$\epsilon(t) = \sigma_{AVE} \cdot D(t)$$

$$D(t) = D_0 + D_1 t$$

$$\dot{\epsilon}_p(t) = \sigma_{AVE} \cdot \frac{dD(t)}{dt} = \sigma_{AVE} D_1 m t^{m-1}$$

$$\dot{\epsilon}_{pmax}(t) = \sigma_{AVE} \cdot \frac{dD(t)}{dt} = \sigma_{AVE} D_1 m (1000)^{m-1}$$

Sebbene la formulazione del creep strain rate derivi dai risultati dell'esecuzione di una prova di creep, il modello determina, tramite espressioni empiriche, i parametri di creep ( $m$  e  $D_1$ ), in dipendenza delle proprietà volumetriche, della gradazione degli aggregati, delle caratteristiche del legante, della miscela.

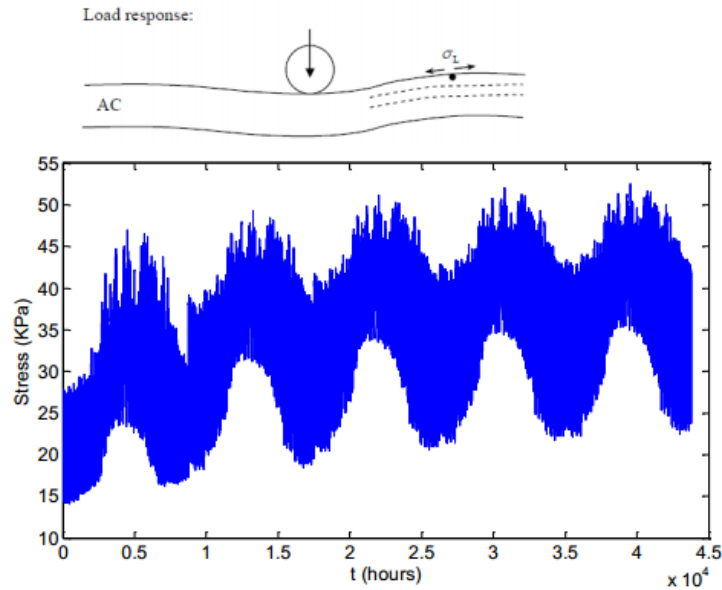


Figura 1.37: sollecitazioni veicolari sulla superficie, calcolate dal modello al variare del tempo

$$\frac{DCSE_T}{\Delta t} = [\sigma(t) - \sigma(t - \Delta t)] \cdot [\varepsilon_{cr}(t) - \varepsilon_{cr}(t - \Delta t)]/2$$

dove:

- $\frac{DCSE_T}{\Delta t}$  è il danno indotto sulla superficie della pavimentazione da stress di natura termica per ogni intervallo di tempo  $\Delta t$  ;
- $\sigma(t)$ ,  $\sigma(t - \Delta t)$  sono gli sforzi trasversali di natura termica al tempo  $t$  e al tempo  $t - \Delta t$  , di valore massimo fissato arbitrariamente pari a 68.9 kPa (10 psi), tale da non superare il limite di attrito convenzionale per una miscela tipica (figura 1.38);
- $\varepsilon_{cr}(t)$ ,  $\varepsilon_{cr}(t - \Delta t)$  sono i valori di creep strain rate al tempo  $t$  e al tempo  $t - \Delta t$ , di uguale significato rispetto ai parametri corrispondenti al danno da traffico riportati in precedenza, con l'aggiunta di un fattore di scala 3600 nella formulazione finale:

$$\dot{\varepsilon}_{cr}(t) = \sigma \cdot \frac{dD(t)}{dt} = \sigma D_1 m (1000)^{m-1} * 3600$$

Il modello propone una formulazione empirica dei parametri di creep ( $m$  e  $D_1$ ) da utilizzare per il calcolo del creep strain rate, dipendenti dalle proprietà del bitume, dalle proprietà volumetriche e dall' assortimento granulometrico della miscela.

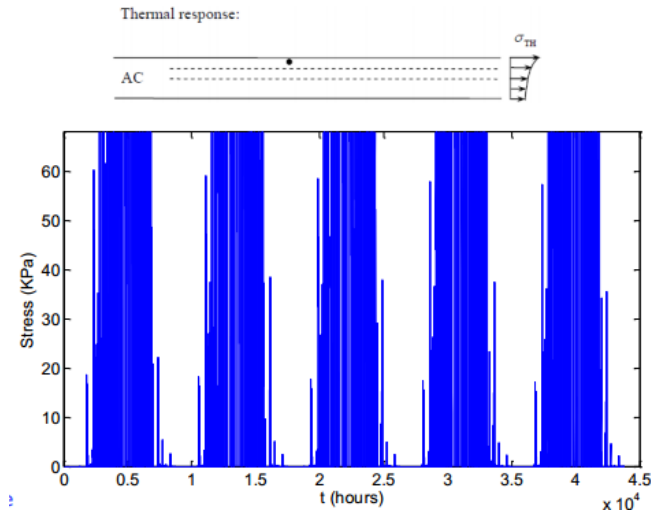


Figura 1.38: sollecitazioni di natura termica, calcolate dal modello al variare del tempo

Il danno effettivo indotto sulla pavimentazione è pari al danno totale indotto (di natura veicolare e di natura termica), la cui formulazione è stata presentata in precedenza, tolta la quota di danno risanata per via della capacità di autoriparazione della miscela, espressa tramite il parametro  $h_{ym}(t)$  (figura 1.39):

$$DCSE_{remain} = DCSE_{induced} \cdot (1 - h_{ym})$$

$$DCSE_{remain}(\Delta t) = (1 - h_{ym}) \cdot [n \cdot \left(\frac{DCSE_L}{cycle}\right) + DCSE_T(\Delta t)]$$

dove:

- $DCSE_{remain}$  è il danno effettivo indotto sulla pavimentazione da traffico e stress termici;
- $h_{ym}$  è la parte di danno recuperata dalla capacità di healing della miscela;
- $n$  è il numero di cicli di carico da traffico nell'intervallo di tempo  $\Delta t$ ;
- $DCSE_L$  è il danno totale indotto sulla pavimentazione dai carichi da traffico;
- $DCSE_T$  è il danno totale indotto sulla pavimentazione da stress di natura termica.

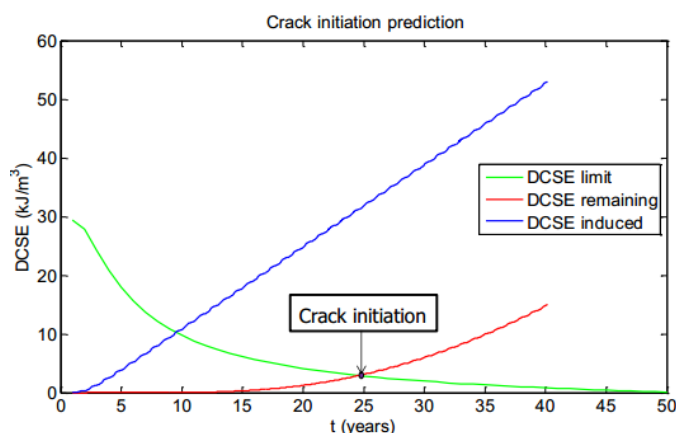


Figura 1.39: innesco della fessura, secondo il modello HMA-FM

Definito inoltre il parametro “dissipate creep strain energy normalizzato” ( $DCSE_{norm}$ ) come il rapporto tra il danno effettivo totale indotto sulla pavimentazione in un dato tempo  $t$  e il limite di danno in quel tempo  $t$ , la condizione critica di frattura della pavimentazione si ha quando tale rapporto supera l’unità. Dalla teoria, si origina uno schema di propagazione della fessura di tipo discontinuo (andamento a gradini) (figura 1.40):

$$DCSE_{norm}(t) = \frac{DCSE_{remain}(t)}{DCSE_{lim}(t)} \geq 1.0$$

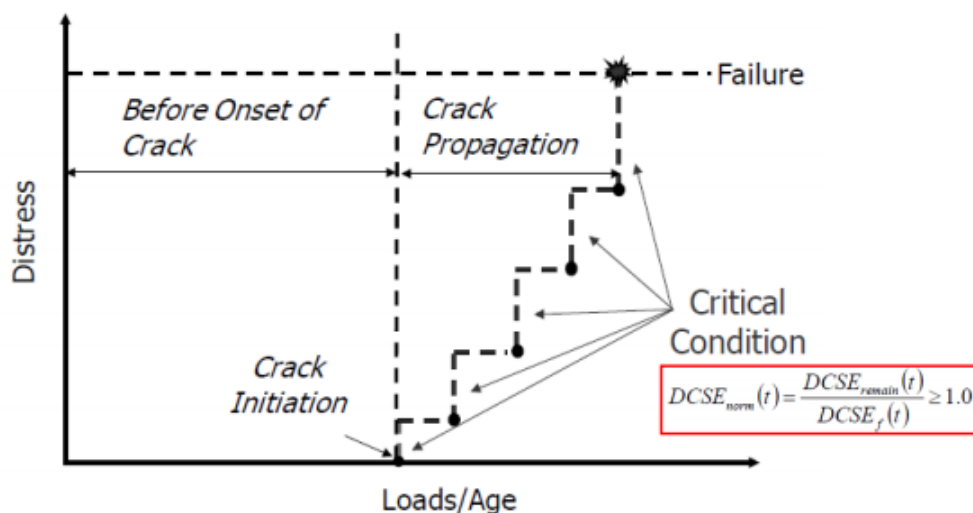


Figura 1.40: schema di propagazione del TDC secondo il HMA-FM model

Il numero di cicli  $N_{f,1}$  necessari per raggiungere tale situazione critica equivalente all’innesco è calcolata con la seguente relazione:

$$N_{f,1}(innesco) = \frac{DCSE_{lim}}{(DCSE/cycle)_{1,1}}$$

dove:

$(DCSE/cycle)_{1,1}$  esprime la velocità del danno, relativo alla zona 1 (la zona della pavimentazione dove per prima si manifesta la fessura) per la condizione 1.

Per effetto dell'innesco della cricca nella zona 1 è necessario ricalcolare la nuova distribuzione delle tensioni tenendo conto della concentrazione degli sforzi all'apice della discontinuità, in funzione della quale si ricalcoleranno i valori medi delle trazioni nelle diverse zone, in particolare nella zona 2 contigua. Da tale valore, si ricava il seguente numero di cicli, durante il quale vi è un accumulo del danno senza progressione della lunghezza della fessurazione:

$$N_{f,2}(propagazione) = \frac{DCSE_{lim} - (DCSE/cycle)_{2,1} \cdot N_{f,1}}{(DCSE/cycle)_{2,2}}$$

dove:

- $(DCSE/cycle)_{2,1}$  esprime la velocità del danno per la zona 2 nella condizione 1;
- $(DCSE/cycle)_{2,2}$  esprime la velocità del danno per la zona 2 nella condizione 2

Il procedimento viene iterato proseguendo con tale metodologia (figura 1.41), per analizzare la propagazione della fessura attraverso le diverse zone in cui è stato suddiviso arbitrariamente lo strato di pavimentazione in conglomerato bituminoso (tipicamente le zone si assumono di spessore pari a 5 mm per cogliere l'effetto della concentrazione degli sforzi vicino ai punti di contatto tra i granuli di aggregati nella miscela).

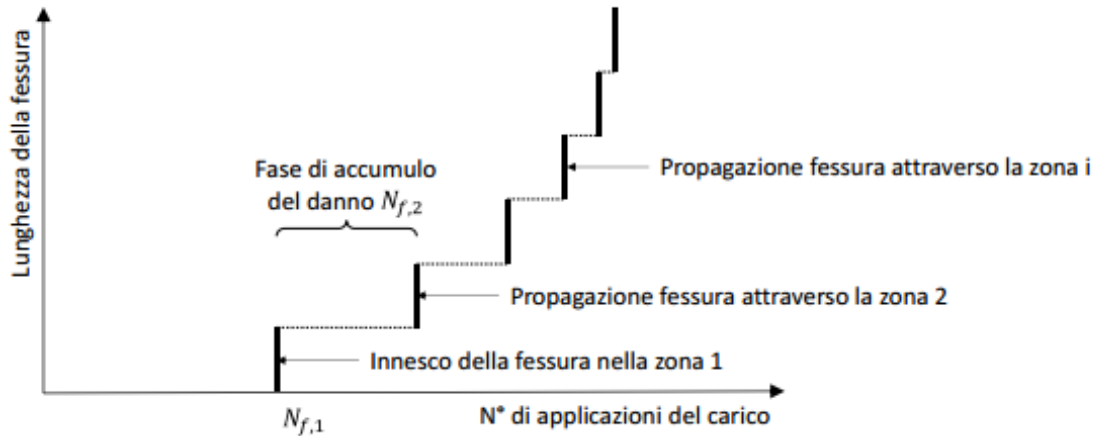


Figura 1.41: fase di propagazione e accumulo del danno, secondo il modello HMA-FM

Per una maggiore chiarezza si riporta una tabella riepilogativa (figura 1.42) di tutti i sub-modelli utilizzati nel modello generale HMA-FM e descritti in maniera discorsiva:

Sub-model	Sub-model component	Input requirement
Material property model	AC stiffness aging model	- Basic mixture characteristics (gradation, binder type, mix volumetrics) - Temperature, loading time, and aging time
	AC tensile strength aging model	- Stiffness (from AC stiffness aging model)
	Fracture energy limit aging model	- Material coefficients $a_n$ - Stiffness (from AC stiffness aging model)
	Healing model	- Initial fracture energy - Aging parameter $k_1$ (to be determined in calibration) - Stiffness (from AC stiffness aging model) - Initial fracture energy - Critical stiffnesses.
Pavement response model	Load response model	- Structural properties of each layer (thickness, modulus, and Poisson's ratio) - Stiffness (from AC stiffness aging model) - Equivalent single axle load
	Thermal response model	- Structural property of AC layer (thickness) - Relaxation modulus master curve parameters: $E_i, \lambda_i, \eta_v$ - Temperature and thermal contraction coefficient

Sub-model	Sub-model component	Input requirement
Pavement fracture model	Crack initiation model	- Load and thermal-induced stresses (from response models) - Creep compliance master curve parameters: $m, D_1, \eta_v$ - Mixture fracture and healing properties (from material property model) - Traffic (in ESALs)
	Crack growth model	- Time and location of initial crack (from crack initiation model) - Structural properties of each layer (thickness, modulus, and Poisson's ratio) - Stiffness (from AC stiffness aging model) - Thermal-induced stresses (from thermal response model) - Stress intensity factor for an edge crack - Creep compliance master curve parameters: $m, D_1, \eta_v$ - Mixture fracture and healing properties (from material property model) - Traffic (in ESALs)
	Crack amount model	- Change of crack depth over time (from crack growth model)

Figura 1.42: tabella riepilogativa dei sub-modelli utilizzati nell'ambito del HMA-FM model

Naturalmente, lo schema di propagazione del meccanismo di top-down cracking, rappresentato dal modello, è fortemente influenzato dal numero di cicli di carico trasmessi alla pavimentazione durante il periodo di analisi (si ricorda infatti che la causa determinante per l'innesco e lo sviluppo della fessurazione da top-down è rappresentata dal regime di sforzi di trazione nati all'interfaccia pneumatico-pavimentazione, causati dal passaggio veicolare) (figura 1.43). Studi di Birgisson [22], inerenti l'influenza degli spettri di traffico sulla propagazione, hanno mostrato come considerare lo spettro dei veicoli agenti sulla pavimentazione, caratterizzati da pesi, configurazione di pneumatici e assi differenti, in luogo di riferirsi al numero di assi equivalenti, produce un danno calcolato dal modello HMA-FM maggiore. Lo sviluppo della fessurazione da top-down, al contrario del dissesto classico da fatica tipo bottom-up, è sensibile allo spettro delle configurazioni dei carichi di traffico, comportando un incremento del danno.

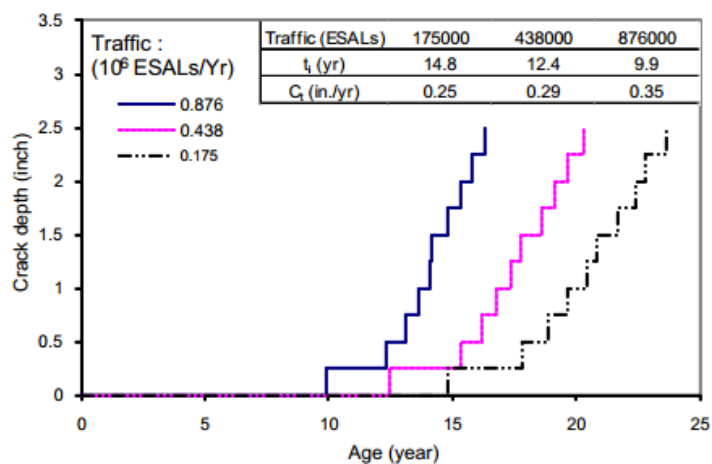
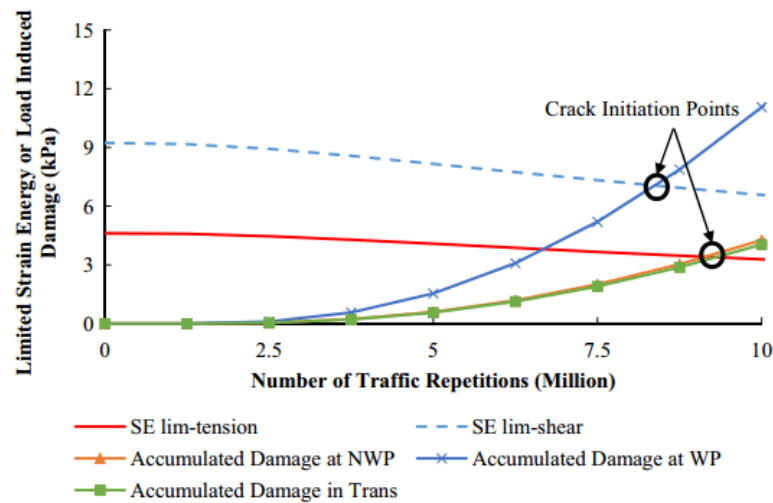


Figura 1.43: influenza del traffico sulla propagazione suggerita dal modello HMA-FM

Basandosi sulla teoria generale del modello HMA-FM, è possibile anche formulare uno schema di propagazione più specifico nel quale vengono differenziati diversi meccanismi di danno e soglie energetiche correlate [23]. Nel dettaglio, è possibile esprimere separatamente, in tre modi differenti, il danno prodotto sulla superficie della pavimentazione causato da sforzi di taglio, sforzi longitudinali e sforzi trasversali. Dall'altro lato, una soglia energetica è associata al danno prodotto da sollecitazioni di taglio, mentre un altro limite energetico è correlato all'innesco della cricca a seguito di sforzi di trazione (longitudinali e trasversali). In questo modo lo schema di propagazione del meccanismo presenta diversi rami in base alla natura della sollecitazione trasmessa (e di conseguenza al limite energetico collegato). Sforzi di taglio e sforzi di trazione, infatti, non hanno lo stesso effetto nella propagazione



del danno, e in particolare, dal modello, risulta che la fessura si origina prima per via del danno indotto da tensioni di taglio, in direzione verticale (figura 1.44).



**Figura 1.44:** propagazione del TDC in cui si differenziano le tre tipologie di sollecitazioni agenti sulla superficie e si considerano due diverse soglie energetiche associate

### *Modello basato sul calcolo dell'integrale J (Lytton)*

Il modello di Lytton riconosce come cause principali della formazione e propagazione del TDC due meccanismi di sollecitazione: sforzi dovuti al contatto pneumatico-pavimentazione (che a loro volta si configurano in tre tipologie diverse) e stress di natura termica. Secondo la teoria su cui si basa il modello, il fenomeno è poi incrementato dalle variazioni di temperatura giornaliera e stagionale e dall'invecchiamento del conglomerato, tramite specifici sub-modelli appositamente elaborati, e presentati in breve nel seguito [9,10].

La modellazione proposta negli studi di Lytton fondamentalemente si basa sulla legge di fatica di Paris e sul calcolo dell'integrale J.

In generale la Legge di Paris (figura 1.45) è espressa come:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^n$$

dove:

- a è la dimensione del difetto;

- $\frac{da}{dN}$  è la velocità di propagazione della cricca;
- K è il fattore di intensificazione degli sforzi;
- C,n sono costanti dipendenti dal materiale.

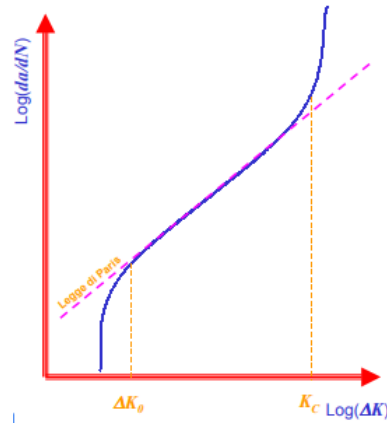


Figura 1.45: rappresentazione della Legge di Paris

Nel caso particolare di studio del TDC, la Legge di Paris può essere espressa come:

$$\frac{dc}{dN} = A' \cdot J^{n'}$$

dove:

- c è lo spessore della singola macro fessura innescata da carichi di traffico o stress termici;
- N è il numero di passaggi veicolari o variazioni di temperatura;
- A', n' dipendono dalle proprietà del materiale legate alla resistenza alla frattura (variano con l'invecchiamento, infiltrazione d'acqua superficiale e composizione del conglomerato) (n' è inversamente proporzionale al parametro m, pendenza della curva log(J-compliance)- log(t));
- J è il valore dell'integrale J sull'apice della cricca.

La Legge di Paris applicata al top-down cracking può essere ulteriormente specificata considerando lo spettro di traffico :

$$\Delta c = \sum_{i=1}^{38 \times 4} \Delta N_i \cdot A' \cdot (J_{id})^{n'}$$

dove

- $i$  è il livello di carico  $i$ -esimo dello spettro e  $d$  la collocazione dell'apice della fessura sotto la superficie della pavimentazione; ci sono 38 livelli di carico per 4 tipi di asse (singolo, tandem, tridem, a 4 assi);
- $\Delta N_i$  e  $J_{id}$  sono, rispettivamente, il numero di cicli del carico  $i$ -esimo di uno specifico tipo di asse e l'integrale  $J$  all'apice della fessura collocata ad una profondità  $d$ , calcolato per quel livello di carico  $i$ -esimo e tipo di asse.

La definizione dell'integrale  $J$ , dalla teoria della meccanica della frattura, può essere formulata come la misura della densità di energia di deformazione all'apice di una cricca, nel caso di un materiale con comportamento non lineare elastico:

$$J = \int_{\Gamma} (W dy - t \cdot \frac{\partial u}{\partial x} ds)$$

dove:

- $\Gamma$  è il percorso antiorario arbitrario attorno all'apice della cricca;
- $W$  è la densità di energia di deformazione;

$$W = \int_0^{[\varepsilon]} [\sigma] : d[\varepsilon]$$

- $t$  è il vettore di trazione;
- $u$  è il vettore spostamento;
- $ds$  è la lunghezza incrementale lungo il percorso  $\Gamma$ .

Il modello calcola, tramite un'analisi elastica lineare, le tensioni all'interfaccia e di conseguenza tramite l'integrale  $J$  e l'applicazione della Legge di Paris, studia la propagazione della cricca. In particolare, secondo la teoria, le tensioni di contatto pneumatico-pavimentazione si sviluppano in 3 direzioni differenti (figura 1.46) (e l'integrale  $J$  viene calcolato separatamente per ciascuna):

- direzione verticale (mode II, shearing mode);
- direzione longitudinale (verso di percorrenza veicolo, mode III, tearing mode);
- direzione trasversale (perpendicolare alla direzione longitudinale, mode I, opening mode).

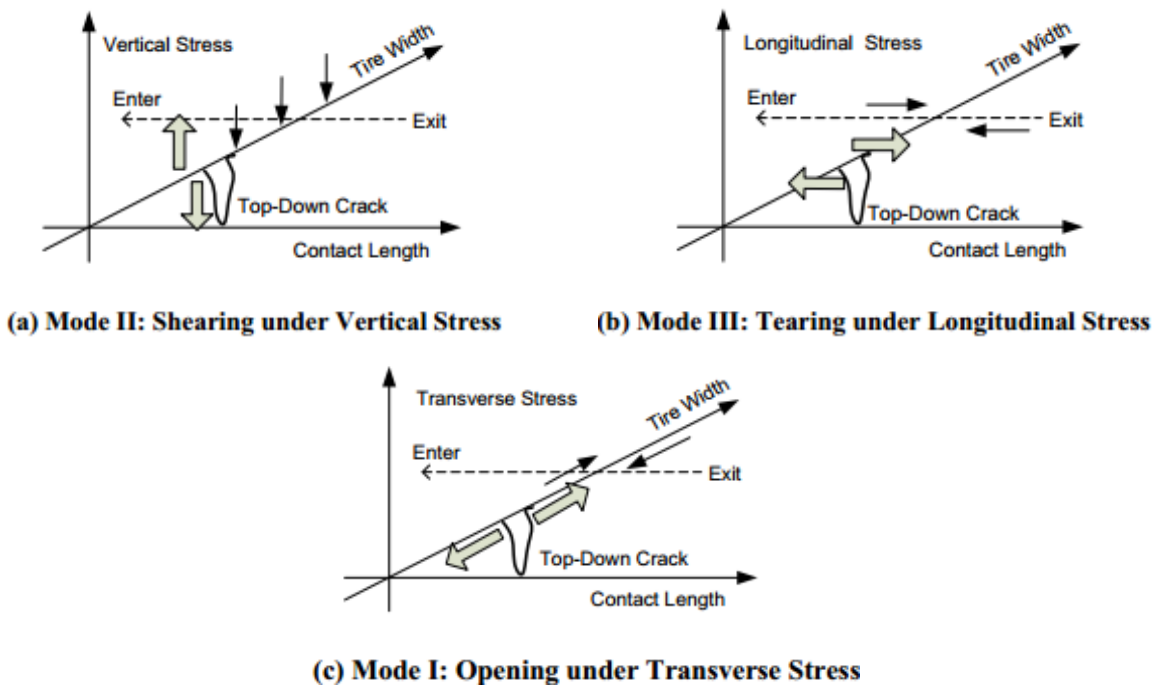


Figura 1.46: tre tipologie di sforzi indotti dal traffico, considerate dal modello

Oltre che considerando le tre tipologie di sollecitazione da traffico, l'integrale J viene calcolato in relazione alle tensioni generate da variazioni termiche; tuttavia è stato osservato che tale integrale J (per le variazioni di temperatura) è sensibilmente inferiore rispetto al valore dell'integrale J per il carico da traffico: da ciò si deduce che l'effetto degli stress termici nella propagazione della fessurazione da top-down rappresenti un fattore secondario. In generale, l'andamento del valore dell'integrale J con la profondità della pavimentazione conferma come tale fenomeno abbia inizio in prossimità della superficie (figura 1.47).

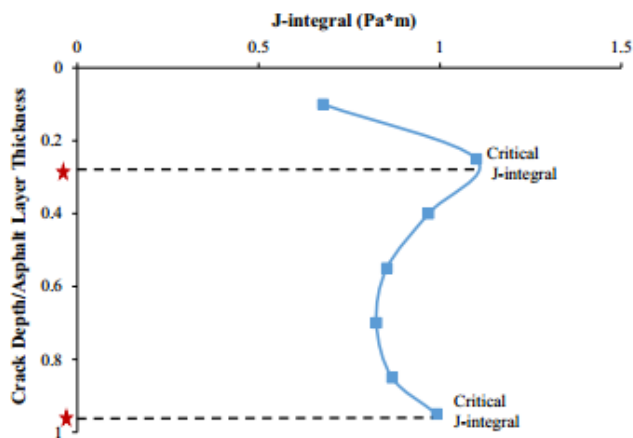


Figura 1.47: andamento del valore dell'integrale J con la profondità

Riconosciuto come uno dei fattori determinanti nello sviluppo della fessurazione da top-down, il modello di Lytton tiene in considerazione, separatamente, la differenza di aging nello spessore della pavimentazione (che causa gradienti di rigidità nella pavimentazione) e l'evoluzione del fenomeno di invecchiamento a lungo termine, nel tempo.

I parametri  $A'$  e  $n'$  e l'integrale  $J$ , su cui trova fondamento tale modellazione, risentono infatti dell'invecchiamento del conglomerato. In particolare,  $n'$  aumenta, evidenziando una maggiore suscettibilità alla frattura. Inoltre i valori di  $m$  e  $E_1$  del modulo di rilassamento, diminuiscono e aumentano rispettivamente; in questo modo il materiale diviene meno viscoelastico e perde la capacità di rilassamento.

Di seguito, si riportano in ordine, le formulazioni dell'effetto della non uniformità del fenomeno di invecchiamento (con la profondità) e l'effetto dell'evoluzione nel tempo dell'aging (basato su parametri cinetici come l'energia di attivazione), utilizzati nella modellazione descritta:

$$E(z) = E_d + (E_0 - E_d) \left( \frac{d - z}{d} \right)^n$$

dove:

- $E_d$  è il modulo dello strato di usura;
- $E_0$  è il modulo dello strato di base;
- $d$  è lo spessore del pacchetto degli strati legati;
- $n$  è un fattore di forma del gradiente del modulo (rappresenta la pendenza del grafico dello sviluppo del modulo al variare della profondità).

In superficie difatti si rileva una più alta percentuale di vuoti (per pavimentazione drenante) e un modulo più elevato per via del più alto grado di invecchiamento: entrambi favoriscono l'innesco della fessurazione in superficie.

$$|E^*|_b = |E^*|_{bi} + (|E^*|_{b0} - |E^*|_{bi})(1 - e^{-k_{fb}t}) + k_{cb}t \quad (*)$$

$$k_{cb} = A_{cb} e^{-\frac{E_{acb}}{RT_{field}}} \quad (*)$$

$$k_{fb} = A_{fb} e^{-\frac{E_{afb}}{RT_{field}}} \quad (*)$$

È calcolato sia per lo strato di base che per lo strato di usura; il pedice b fa riferimento allo strato di base, la formulazione correlata allo strato di usura è analoga e non viene riportata (presenta il pedice s).

dove:

- $|E^*|_i$  è il modulo iniziale;
- $|E^*|_0$  è il valore dell'intercetta del prolungamento del tratto a velocità costante nel grafico dello sviluppo del modulo (figura 1.48);
- $k_{cb}$  è una costante relativa al tratto constant-rate nel grafico dello sviluppo del modulo nel tempo;
- $k_{fb}$  è una costante relativa al tratto fast-rate nel grafico dello sviluppo del modulo nel tempo;
- $t$  è il tempo di invecchiamento;
- $A_f$  e  $A_c$  sono termini che precedono l'esponenziale relativo al tratto fast-rate e constant-rate, rispettivamente;
- $E_{af}$  e  $E_{ac}$  è l'energia di attivazione dell'invecchiamento nel tratto fast-rate e constant-rate, rispettivamente;
- $R$  è la costante universale dei gas;
- $T_{field}$  è la temperatura caratteristica del fenomeno di invecchiamento.

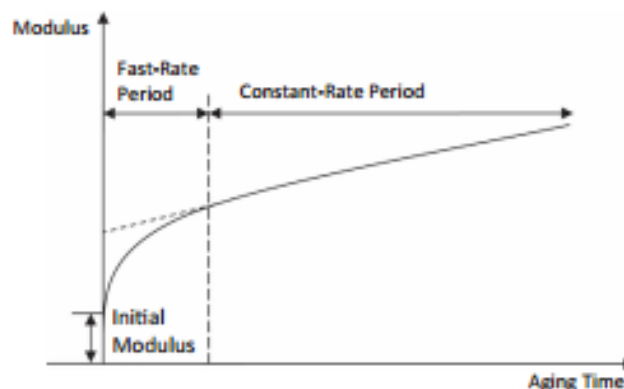


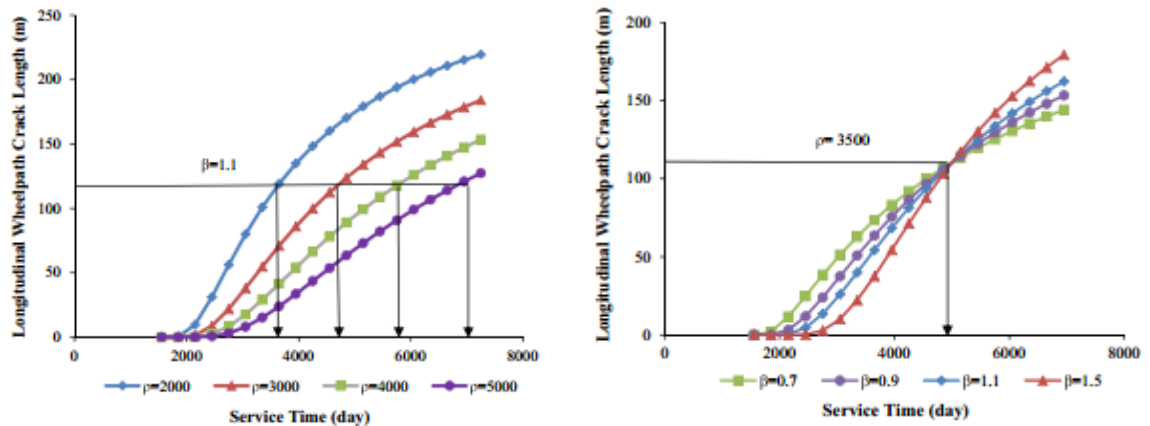
Figura 1.48: diagramma di riferimento della variazione del modulo di rigidità nel tempo

Nello stesso ambito di ricerca è stato sviluppato un modello di previsione delle caratteristiche prestazionali della pavimentazione attraverso il calcolo della lunghezza di sviluppo della fessurazione da top-down nel tempo (e quindi all'aumentare dei cicli di carico):

$$l(t) = l_0 e^{-\left(\frac{\rho}{t-t_0}\right)^\beta}$$

dove:

- $l(t)$  rappresenta la lunghezza della fessura al tempo  $t$ ;
- $l_0$  è la lunghezza massima teorica (fissata pari a 300 m);
- $t_0$  è il tempo di inizio fessurazione;
- $\rho$  è un parametro di scala (identificato come il tempo di servizio nel quale si manifesta una fessurazione da TDC pari a  $1/e$  (36.8%) della lunghezza massima (fissata a 300 m)) (figura 1.49 a-b);
- $\beta$  è un parametro di forma (inversamente proporzionale al fattore di scala) (figura 1.49 a-b).



**Figura 1.49:** influenza del parametro  $\rho$  (a) e del parametro  $\beta$  (b) nello schema di propagazione della fessura da top-down

Estendendo l'ipotesi dell'accumulo del danno di Miner al caso in esame, vengono sommati, in modo pesato, i diversi meccanismi di danno che portano alla fessurazione da top-down (shearing mode, opening mode, tearing mode, danno da variazioni termiche). La sommatoria si esplicita nell'espressione dei parametri  $\rho$  e  $\beta$  che caratterizzano a loro volta la curva di sviluppo della lunghezza di fessurazione:

$$\rho = N_s \left( \alpha_0 - \alpha_1 \frac{N_s}{N_o} - \alpha_2 \frac{N_s}{N_L} - \alpha_3 \frac{N_s}{N_T} \right)$$

$$\beta = \frac{1}{N_s} \left( \beta_0 - \beta_1 \frac{N_o}{N_s} - \beta_2 \frac{N_L}{N_s} - \beta_3 \frac{N_T}{N_s} \right)$$

dove:

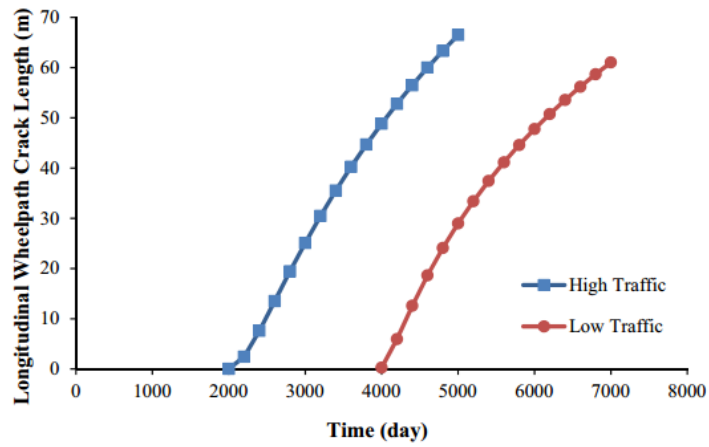
- $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  e  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  sono coefficienti di calibrazione per  $\rho$  e  $\beta$ , rispettivamente;
- $N_s$  rappresenta il numero di giorni necessari per raggiungere una profondità standard fissata della fessura attraverso una sollecitazione di tipo shearing mode (direzione verticale);
- $N_o$  rappresenta il numero di giorni necessari per raggiungere una profondità standard fissata della fessura attraverso una sollecitazione di tipo opening mode (direzione trasversale);
- $N_L$  rappresenta il numero di giorni necessari per raggiungere una profondità standard fissata della fessura attraverso una sollecitazione di tipo tearing mode (direzione longitudinale);
- $N_T$  rappresenta il numero di giorni necessari per raggiungere una profondità standard fissata della fessura attraverso una sollecitazione derivante da variazioni termiche.

Utilizzando tale modello di sviluppo, si è potuto operare uno studio parametrico che ha confermato diverse conclusioni già trattate nel dettaglio nello studio delle cause del top-down cracking (figura 1.50):

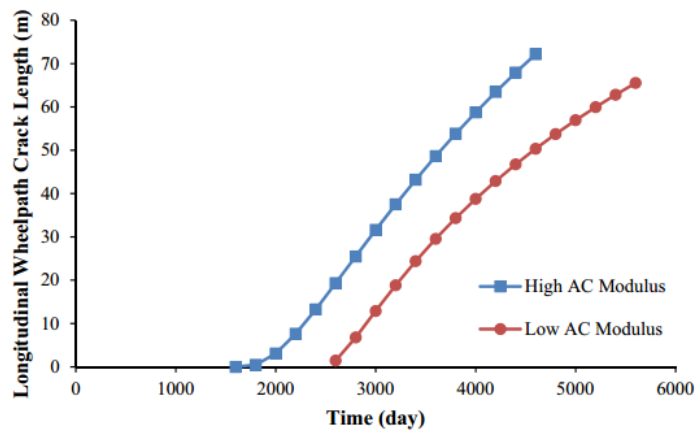
- aumentando il valore di AADTT (Annual Average Daily Truck Traffic), si riduce il tempo di inizio fessurazione ( $t_0$ ) e il periodo di «pre-fatigue life» (tempo che intercorre tra l'inizio della fessura e momento in cui la pavimentazione richiede un intervento di riabilitazione);
- diminuendo il valore di  $m$  (pendenza curva grafico creep-compliance, producendo un decremento della capacità di rilassamento della miscela), si riduce il tempo di inizio fessurazione ( $t_0$ ) e il periodo di «pre-fatigue life»;
- l'aumento del valore del modulo della pavimentazione riduce  $t_0$ , ma riduce la velocità di propagazione della fessura dopo aver raggiunto una certa lunghezza;
- l'aumento degli spessori dello strato di usura e strato di base produce un aumento del periodo «pre-fatigue life»;



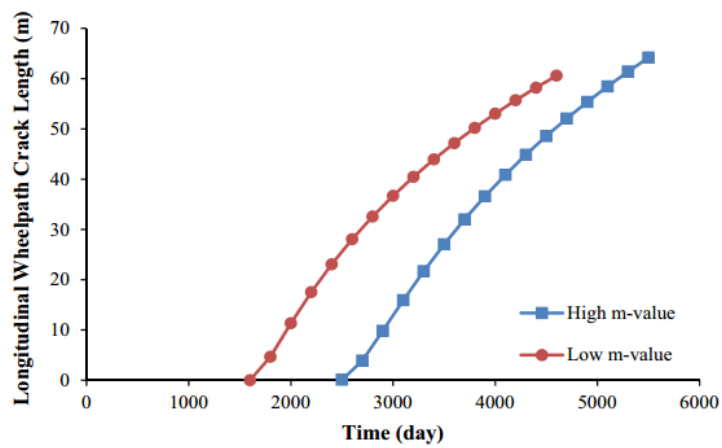
- l'influenza di un eventuale aumento dello spessore dello strato di usura è maggiormente determinante rispetto ad un aumento dello spessore dello strato di base.



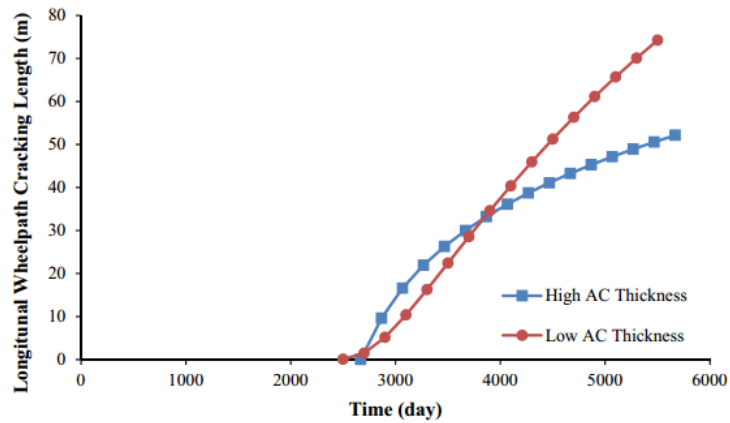
(a) Effect of AADTT



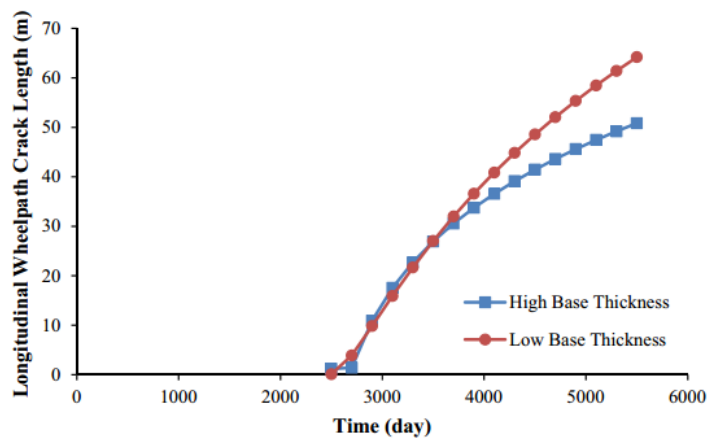
(b) Effect of Asphalt Layer Modulus



(c) Effect of m-value



(d) Effect of Asphalt Layer Thickness



(e) Effect of Base Layer Thickness

Figura 1.50: studio parametrico del modello di sviluppo della lunghezza della fessura da top-down

## 1.6 Indici di caratterizzazione sperimentale della resistenza al top-down cracking

Nonostante il top-down cracking sia considerato oggi come una delle tipologie di dissesto più comuni in una pavimentazione stradale di tipo flessibile, manca ancora un consenso generale su valide metodologie di laboratorio utili a caratterizzare il problema in

termini di resistenza a fessurazione superficiale della miscela in esame. Test classici, che rientrano in una caratterizzazione standard di laboratorio (come ad esempio valutazione della resistenza a trazione tramite prova di rottura a trazione indiretta), non sono in grado di fornire, come risultato, un unico parametro esplicito, che da solo è in grado di descrivere in modo sintetico le prestazioni della miscela nei confronti del top-down cracking riscontrabili poi sul campo, e che allo stesso è sensibile a tutti i parametri determinanti per lo sviluppo del fenomeno (invecchiamento della miscela, tenore dei vuoti, contenuto di legante, contenuto di conglomerato riciclato, ecc). Di seguito si riportano, in breve, una serie di metodologie di indagini di laboratorio, dalla cui elaborazione si ricavano parametri numerici che più o meno bene offrono informazioni riguardanti la propensione diretta alla fessurazione superficiale della miscela; non vi è una singola prova riconosciuta come la più valida ma se ne individuano diverse con aspetti positivi e negativi differenti.

#### *Metodo basato sul concetto di ER (Energy Ratio)*

Tale metodologia di prova si basa sulla determinazione del parametro di resistenza a fessurazione denominato ER (energy ratio), tramite l'esecuzione di tre differenti tests di laboratorio [14,24,25,26]:

1. test per la determinazione del modulo resiliente della miscela (MR) (ASTM D7369);
2. test per la determinazione della creep compliance (AASHTO T322);
3. test per la determinazione della resistenza a trazione indiretta (ASTM D6931).

Tutte e tre le singole prove sono eseguite ad una temperatura di 10°C, utilizzando un'apparecchiatura servo-idraulica (figura 1.51) e provini di 150 mm di diametro, spessore tra i 38 e i 50 mm circa, ricavati da campioni più grandi compattati da pressa giratoria. Per la misurazione del regime di deformazioni su entrambe le facce del provino, si posizionano estensimetri verticalmente (nella direzione di carico) e orizzontalmente (in direzione perpendicolare al carico).



**Figura 1.51:** apparecchiatura utilizzata per la determinazione dell'energy ratio (ER)

1) La prova per la determinazione del modulo resiliente viene condotta tramite la ripetizione di carichi di compressione in una forma impulsiva. Un ciclo di carico consiste in un impulso di carico di 0.1 s e un periodo di riposo di 0.9 s. Il carico di compressione è applicato lungo il piano diametrale verticale del provino e la sua entità è selezionata arbitrariamente, in maniera appropriata, per avere deformazioni orizzontali nel range di 100-200 micro strain. Gli estensimetri sono attaccati a ciascuna faccia del provino per misurare le deformazioni verticali e orizzontali risultanti. La quota di deformazione recuperata è utilizzata per calcolare il valore di modulo resiliente e del modulo di Poisson ( $\mu$ ).

$$\mu = \frac{l4 - l1 \cdot \left(\frac{\delta_v}{\delta_h}\right)}{l3 - l2 \cdot \left(\frac{\delta_v}{\delta_h}\right)}$$

$$M_R = \frac{P_{cyclic}}{\delta_h t} \cdot (l1 - l2 \cdot \mu)$$

dove:

- $l1, l2, l3, l4$  sono delle costanti;
- $\delta_v$  rappresenta la deformazione verticale recuperata [mm];
- $\delta_h$  rappresenta la deformazione orizzontale recuperata [mm];
- $P_{cyclic}$  è il carico ciclico applicato al provino [N];
- $t$  è lo spessore del provino [mm].

2) Il test per la determinazione della creep compliance viene condotto attraverso l'applicazione di un carico statico di valore fissato, lungo l'asse diametrico del provino. Il carico applicato viene selezionato per mantenere le deformazioni orizzontali nel campo della viscoelasticità lineare (tipicamente < 500 micro strain). Le deformazioni orizzontali e verticali in prossimità del centro del provino sono raccolte per calcolare la creep compliance in funzione del tempo (una funzione esponenziale viene scelta per meglio rappresentare i risultati misurati) (figura 1.52).

$$D(t) = D_0 + D_1 t^m$$

dove:

- $D_0, D_1, m$  sono i coefficienti della regressione;
- $D(t)$  rappresenta il valore della creep compliance, in un dato tempo  $t$ .

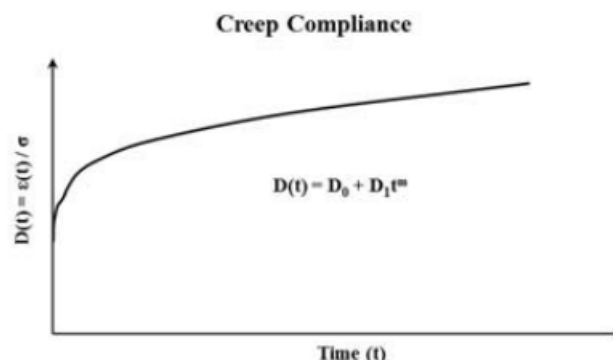


Figura 1.52: creep compliance al variare del tempo

3) La resistenza a trazione indiretta è determinata attraverso l'applicazione di un carico in maniera monotona sul piano diametrico verticale del provino. La velocità di applicazione del carico è pari a 50 mm/min. Il valore del picco del carico viene utilizzato per il calcolo del valore di resistenza a trazione indiretta.

$$S_t = \frac{2000 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot D}$$

dove:

- $S_t$  è la resistenza a trazione indiretta [kPa];
- $P$  è il carico di picco [N];
- $t$  è lo spessore del provino [mm];
- $D$  è il diametro del provino [mm].

Dai risultati dei tre singoli tests è infine possibile calcolare il valore di ER nel modo seguente:

$$ER = \frac{DCSE_{lim}}{DCSE_{min}}$$

$$DCSE_{lim} = FE - \frac{S_t^2}{2 \cdot M_R}$$

$$DCSE_{min} = \frac{m^{2.98} D_1}{0.0299 \cdot \sigma^{-3.10} \cdot (6.36 - S_t) + 2.46 \cdot 10^{-8}}$$

dove:

- DCSEmin è definito come il dissipated creep strain energy accumulato dopo 6000 cicli;
- FE è l'energia di frattura (fracture energy) (figura 1.53);
- St è la resistenza a trazione;
- MR è il modulo resiliente;
- σ è lo sforzo di trazione applicato;
- D1 e m sono i due parametri viscoelastici ottenuti dal test per la determinazione della creep compliance.

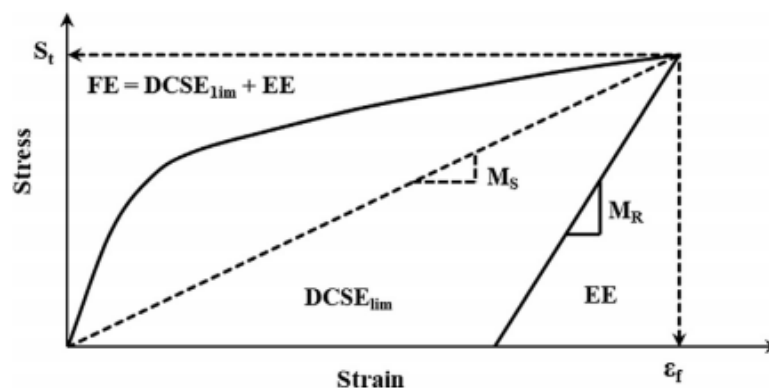


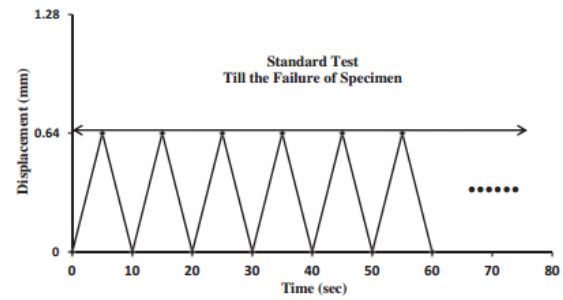
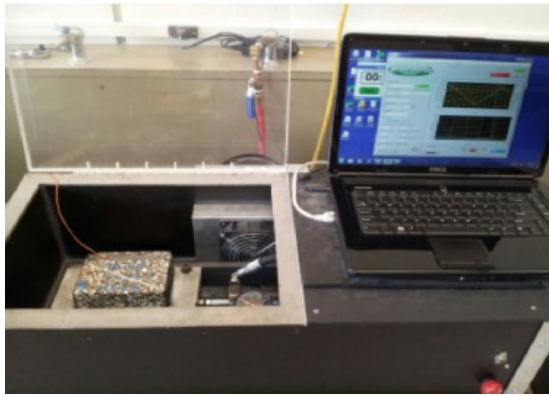
Figura 1.53: significato fisico del FE limit e del DCSE limit

Si prevede che una miscela caratterizzata da un valore di ER più elevato, manifesti una maggiore resistenza a fessurazione. Tuttavia da un'indagine approfondita sulla validità di tale metodologia di prova, si è riscontrato come il valore di ER non descriva in maniera appropriata l'effetto dell'aging sulla miscela (ci si aspetterebbe un valore di ER minore a

causa di una accentuata propensione alla fessurazione, e invece, al contrario, i valore di ER su diversi provini analizzati aumentano, dopo il processo di invecchiamento in laboratorio). Inoltre, analisi della resistenza a fessurazione tramite la valutazione del parametro ER non risultano sensibili all'utilizzo di RAP, RAS e bitume modificato nella miscela (ci si aspetterebbe che la resistenza alla fessurazione da top-down indicata da ER venga incrementata dall'uso di legante modificato e penalizzata per l'aggiunta di RAP e/o RAS, e invece, spesso i risultati si sono dimostrati controversi). In aggiunta, la valutazione delle miscele tramite il parametro ER non è correlabile con le osservazioni raccolte sul campo (miscele caratterizzate da un alto valore di ER, in realtà, in sito, hanno manifestato prima fenomeni di fessurazione superficiale). Per tali ragioni la validità di tale metodologia di indagine sperimentale è assai dubbia [14].

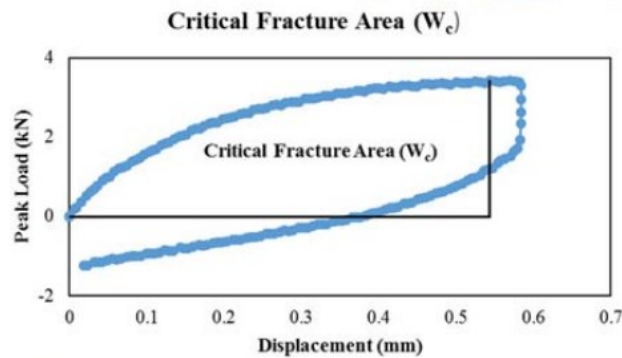
### *Texas-Overlay Test*

Per l'esecuzione del Texas- Overlay Test, vengono utilizzati provini di forma prismatica 150 mm x 76 mm x 38 mm, incollati in un'apparecchiatura costituita da un piano che può traslare orizzontalmente (Tex-248-F). Durante la prova, una parte del piano dell'apparecchiatura rimane fissa mentre un'altra parte si muove in controllo di spostamento, applicando un carico di forma "a denti di sega" in cui ogni ciclo ha durata pari a 10 s (= 0.1 Hz) (5 secondi di carico, 5 secondi di scarico). Il test è eseguito ad una temperatura di 25°C con un valore di MOD (maximum opening displacement, massima apertura della fessura) pari a 0.635 mm (figura 1.54 a-b). Il carico di picco di ogni ciclo è registrato e si considera che il provino sia arrivato a rottura quando il carico necessario per assicurare tale valore prefissato di apertura della fessura sia il 93% inferiore rispetto al carico di picco iniziale. In questa circostanza, il risultato della prova è espresso tramite il numero di cicli necessari per arrivare a rottura (TX-Nf). È inoltre possibile calcolare altri due parametri significativi per la valutazione della resistenza a fessurazione della miscela: il critical fracture energy ( $G_c$ , energia critica di frattura) e il crack resistance index ( $\beta$ , indice di resistenza alla fessurazione) [14,24,27].



**Figura 1.54:** apparecchiatura utilizzata per l'esecuzione del Texas Overlay Test (a); schema di applicazione del carico (b)

Nel primo ciclo di carico, l'area sottesa al digramma del massimo carico di picco (figura 1.55) è utilizzata per determinare il valore di  $G_c$ . Il parametro  $G_c$  indica l'energia necessaria per innescare la fessura nel primo ciclo di carico, cioè descrive le proprietà della miscela durante la fase di innesco della fessurazione.



**Figura 1.55:** diagramma del carico iniziale di picco da cui ricavare il valore dell'area sottesa

$$G_c = \frac{W_c}{b \cdot h}$$

dove:

- $W_c$  è l'area sottesa nel diagramma [J];
- $b$  è lo spessore del provino [mm];
- $h$  è l'altezza del provino [mm].

La curva del carico normalizzato (NL) (rispetto al massimo carico di picco del 1° ciclo) è fittata con un'equazione esponenziale, e il termine dell'esponente (in valore assoluto) della funzione esponenziale è considerato il parametro di resistenza alla fessurazione  $\beta$  (figura



1.56).  $\beta$  è rappresentativo della flessibilità e delle proprietà di fatica della miscela durante la fase di propagazione. Ci si aspetta che miscele con un basso valore del parametro  $\beta$  manifestino una migliore resistenza alla fessurazione rispetto a miscele caratterizzate da alti valori di  $\beta$ .

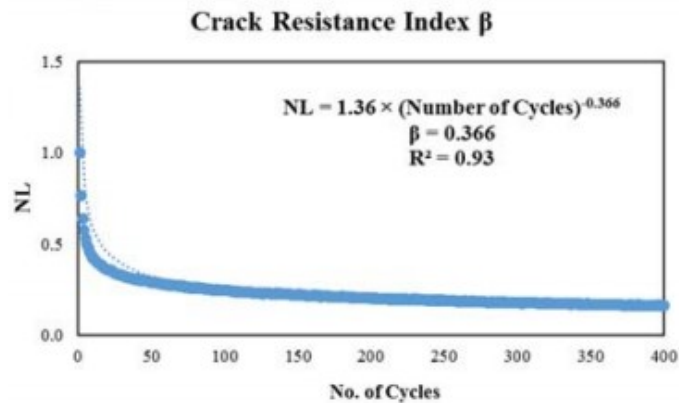


Figura 1.56: rappresentazione della curva del carico normalizzato

Dall'analisi della sensibilità di tale procedura, si è visto in particolare che il parametro  $G_c$ , al contrario di  $N_f$  e  $\beta$ , non è sensibile all'azione dell'aging (i valori di  $G_c$  tendono ad aumentare a seguito di processi di invecchiamento accelerato in laboratorio). Al contrario il parametro  $\beta$  non manifesta sensibilità nei confronti di una variazione di percentuale dei vuoti all'interno della miscela (in teoria, un maggiore tenore dei vuoti dovrebbe causare un peggioramento delle prestazioni di resistenza a fessurazione da TDC della miscela) [14].

#### *NCAT-Modified Overlay Test*

La preparazione del provino è la medesima di quella operata nel Texas Overlay Test, con alcune differenze nell'esecuzione della prova, a seguito di modifiche apportate dal National Center for Asphalt Technology (NCAT) [14,24]:

- un valore minore di massima apertura della fessura (0.381 mm);
- una frequenza di carico più elevata (1 Hz);
- un metodo differente di considerazione della rottura del provino (il picco della curva “carico normalizzato x numero di cicli”) (NLC) per identificare la transizione tra la

fase di micro-fessurazione e la fase di macro-fessurazione, e quindi la rottura) (figura 1.57).

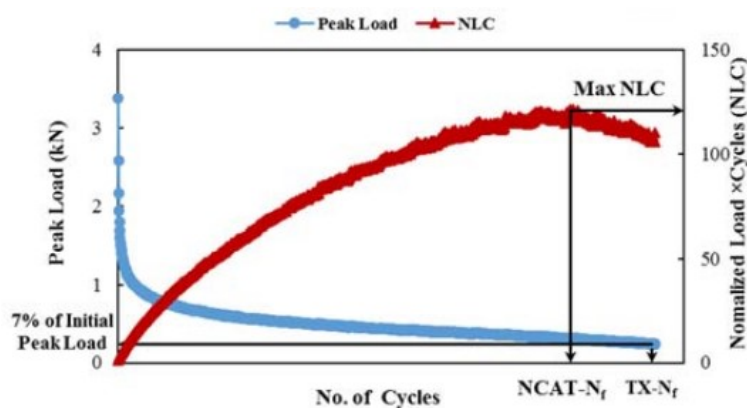


Figura 1.57: differenze del valore di rottura tra curva “carico normalizzato x numero di cicli” (rosso) e curva di carico (blu)

Tramite l’esecuzione di tale prova, alla stessa maniera del Texas-Overlay Test, è comunque possibile determinare l’energia critica di frattura (NCAT-Gc) e l’indice di resistenza alla fessurazione (NCAT-β).

Al contrario di quanto osservato dall’analisi del Texas Overlay Test, i parametri ricavati dall’esecuzione della prova NCAT-Modified Overlay Test sono sensibili al fenomeno dell’invecchiamento della miscela (che produce una riduzione di resistenza a fessurazione), ma non sempre mostrano una corretta sensibilità nei confronti di miscele prodotte con aggiunta di bitume modificato, RAP e/o RAS [14].

### *Semi-Circular Bend Test*

Per l’esecuzione di tale tipologia di indagine di laboratorio, si producono provini di forma semi-circolare (altezza di circa 50 mm), ottenuti tagliando a metà lungo il diametro campioni confezionati e compattati con pressa giratoria. Ogni provino inoltre è dotato di un intaglio sul lato del diametro di larghezza pari a  $3.0 \pm 0.5$  mm, condizionato ad una temperatura di  $25 \pm 0.5$  °C per 2 ore, e caricato con una velocità fissa di applicazione del carico pari a 0.5 mm/min. Le prove vengono eseguite confezionando provini caratterizzati da 3 diversi valori di lunghezza dell’intaglio: 25.4 mm, 31.8 mm e 38.1 mm. I valori delle aree della curva carico-deformazione (figura 1.58 a) così calcolate vengono plottati in un grafico dipendente

sull'asse x dalla diversa lunghezza di intaglio (figura 1.58 b), per creare una funzione di regressione lineare negativa dove la pendenza,  $dU/da$ , è utilizzata come parametro noto per calcolare il valore dell'integrale J [14,24].

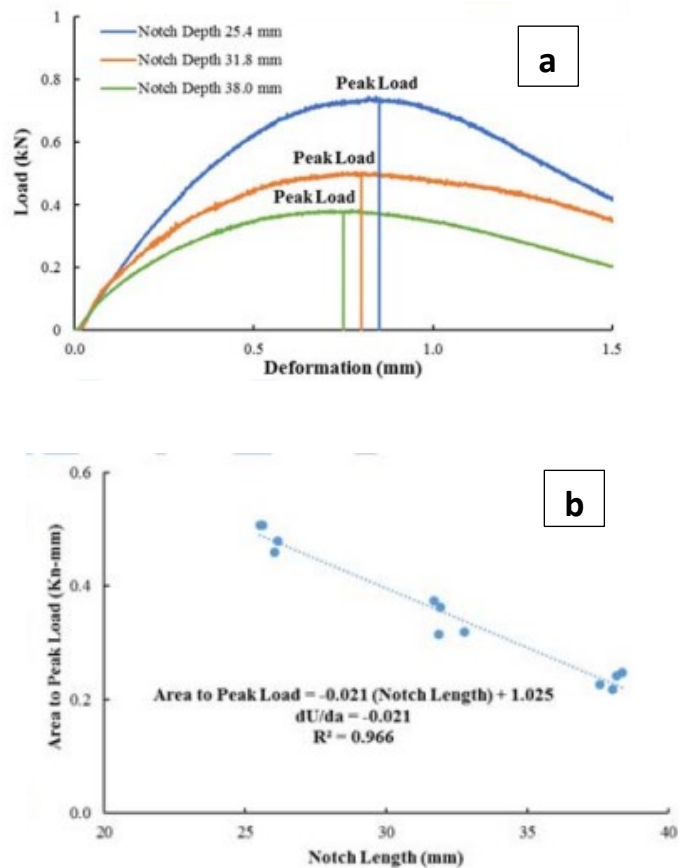


Figura 1.58: curva carico-deformazione (a); diagramma dell'area del carico di picco in funzione della lunghezza dell'intaglio (b)

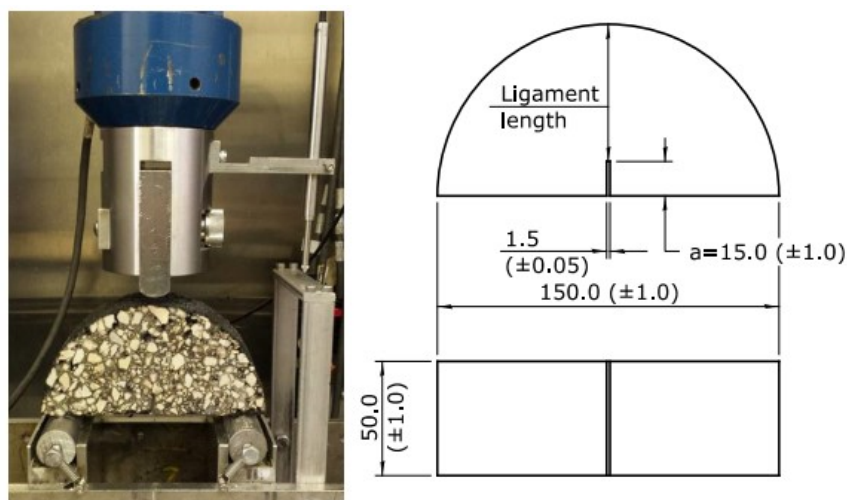
$$J_c = -\left(\frac{1}{b}\right) \frac{dU}{da}$$

dove:

- $J_c$  è l'integrale J (critical strain energy release rate) [KJ/m];
- $b$  è lo spessore del provino [mm];
- $a$  è la lunghezza dell'intaglio [mm];
- $U$  è l'energia di deformazione a rottura (strain energy to failure) [N\*mm];
- $dU/da$  è la pendenza della curva di  $U$ .

Dall'analisi di provini caratterizzati da proprietà composizionali differenti, e condizionati in modo diverso, si è visto che il parametro J è sensibile in particolare al fenomeno di invecchiamento della miscela, ma non ha ottenuto corrispondenze dall'osservazione sul campo (miscele valutate, tramite il parametro J, come le più vulnerabili a fessurazione da TDC, non sono state le prime a manifestare fessurazione in sito) [14].

### *Illinois Flexibility Index Test*



**Figura 1.59:** apparecchiatura di prova (a); specifiche del provino (b)

Tale test è eseguito con la stessa apparecchiatura del metodo “Semi- Circular Bend”, cioè si tratta di una prova di rottura per flessione su tre punti con provini semicircolari. I provini, a tale scopo, sono dotati di intaglio di lunghezza pari a 15 mm e larghezza pari a 1.5 mm lungo l'asse centrale, condizionati per 2 ore ad una temperatura di  $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , e caricati con una velocità di deformazione fissata pari a 50 mm /min (figura 1.59 a-b). Viene registrata la curva di carico-spostamento per determinare la pendenza nel punto di flesso (m) e il valore dell'area sottesa, definito come il lavoro necessario per portare a frattura il provino ( $W_f$ ) (figura 1.60) [14,24,28]

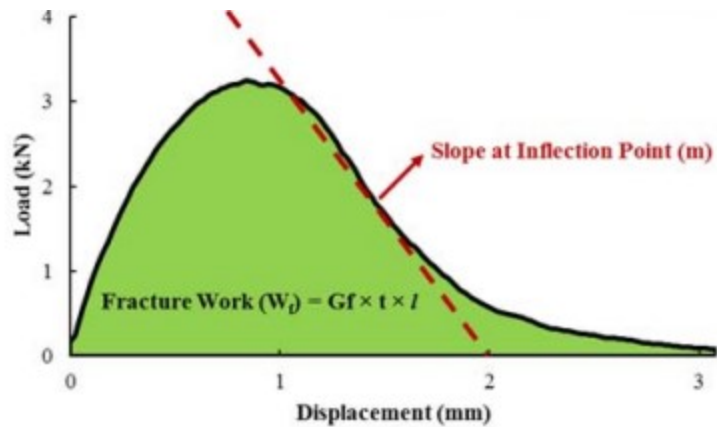


Figura 1.60: curva carico-spostamento di una prova “Illinois Flexibility Index Test”

$$G_f = \frac{W_f}{t \cdot l}$$

$$FI = A \cdot \frac{G_f}{|m|}$$

dove:

- FI è l'indice di flessibilità adimensionale;
- $G_f$  è l'energia di frattura [ $J/m^2$ ];
- $W_f$  rappresenta l'area sottesa alla curva [J];
- $m$  è la pendenza della curva nel punto di flesso;
- $t$  è lo spessore del provino [mm];
- $l$  è la differenza tra il raggio del provino e la profondità dell'intaglio [mm];
- $A$  è un fattore di scala pari a 0.01.

Da analisi sulla sensibilità della metodologia di indagine, in modo simile a quelle effettuate per le altre prove precedentemente descritte, si evince che l'indice di flessibilità descrive bene gli effetti di aging sulla miscela, uso di bitume modificato, aggiunte di RAP e/o RAS. Al contrario non è sensibile ad una variazione del tenore dei vuoti della miscela [14].

### Indirect Tensile Asphalt Cracking Test

Si basa su un'elaborazione dei risultati di una prova a trazione indiretta semplice, senza l'utilizzo di estensimetri per la misurazione delle deformazioni sulle facce del campione. I provini cilindrici di altezza pari a 60 mm circa, condizionati ad una temperatura di  $25 \pm 0.5^\circ$ , vengono caricati in controllo di spostamento, ad una velocità di deformazione uguale a 50 mm/min. La curva carico-spostamento registrata è utilizzata per determinare la pendenza post-picco in corrispondenza del 75% del carico di picco (PP75) e il valore dell'area totale sottesa al grafico, definito come il lavoro necessario per portare a rottura il provino ( $W_f$ ) (figura 1.61). A loro volta, questi due parametri sono utilizzati per la formulazione di un indice di resistenza alla fessurazione (cracking test index, CTindex) [14,29,30].

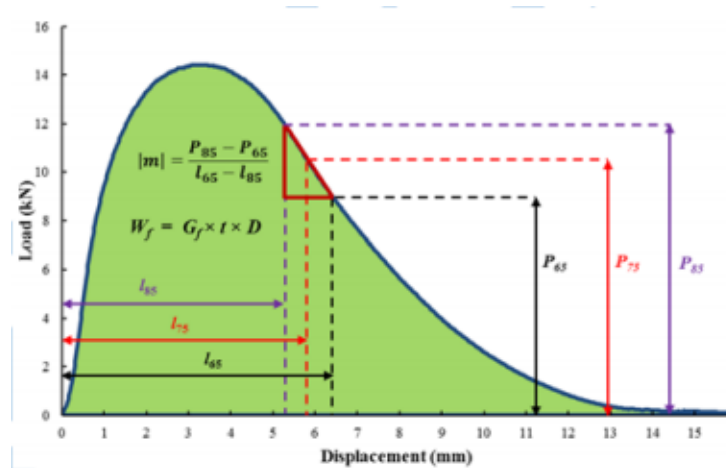


figura 1.61: curva carico-spostamento di una prova a trazione indiretta in cui sono evidenziati i due parametri utili per l'analisi del CTindex:  $m$  (PP75) e  $W_f$ .

$$G_f = \frac{W_f}{t \cdot D}$$

$$CT_{index} = \frac{t}{62} \cdot \frac{G_f}{|m|} \cdot \frac{l_{75}}{D}$$

dove:

- $CT_{index}$  è l'indice di resistenza alla fessurazione adimensionale;
- $G_f$  è l'energia di frattura [ $J/m^2$ ];
- $m$  è la pendenza del punto post-picco in corrispondenza del valore di carico ridotto al 75% (PP75);

- $t$  è lo spessore del provino [mm];
- 175 è lo spostamento in corrispondenza del punto post-picco con carico ridotto al 75% [mm];
- $D$  è il diametro del provino [mm].

La valutazione della suscettibilità alla fessurazione da TDC tramite il parametro  $CT_{index}$  riesce a cogliere correttamente gli effetti di aging sulla miscela (diminuzione della resistenza a fessurazione), eventuali aggiunte di RAP e/o RAS (infragilimento della miscela), utilizzo di legante modificato (miglioramento delle prestazioni). D'altro canto, l'indice non è sensibile alla variazione della percentuale dei vuoti nella miscela poiché talvolta offre indicazioni contrastanti da ciò che è suggerito dalle conoscenze teoriche (cioè una maggiore percentuale di vuoti favorisce azioni di aging più severe e si traduce in una maggiore propensione alla fessurazione del conglomerato) [14].

Diversi autori hanno inoltre formulato l'espressione di un differente indice di resistenza alla fessurazione denominato CI che richiede, come in precedenza, l'esecuzione di una semplice prova a trazione indiretta, senza equipaggiamenti accessori. In particolare, per la determinazione di tale parametro indice è necessario unicamente il valore di  $M_S$  (modulo secante) e  $FE$  (energia di frattura), ricavabili dal grafico sforzo-deformazione (vedi "*Metodo basato sul concetto di ER (energy ratio)*") [25].

$$CI = k_1 \cdot \left(\frac{1}{M_S}\right)^{k_2} \cdot (FE)^{k_2}$$

dove:

- $k_1, k_2, k_2$  sono costanti

Una miscela con un valore di CI alto manifesta una maggiore resistenza a fessurazione; si è inoltre dimostrato che tale parametro è sensibile agli effetti di aging del conglomerato ed è ben correlabile con le prestazioni osservate sul campo.

### *Uniaxial Penetration Test*

Si tratta di un test particolare, utilizzato da alcuni autori per studiare la progressione del dissesto da top-down cracking su carote prelevate in sito caratterizzate da diversi valori di

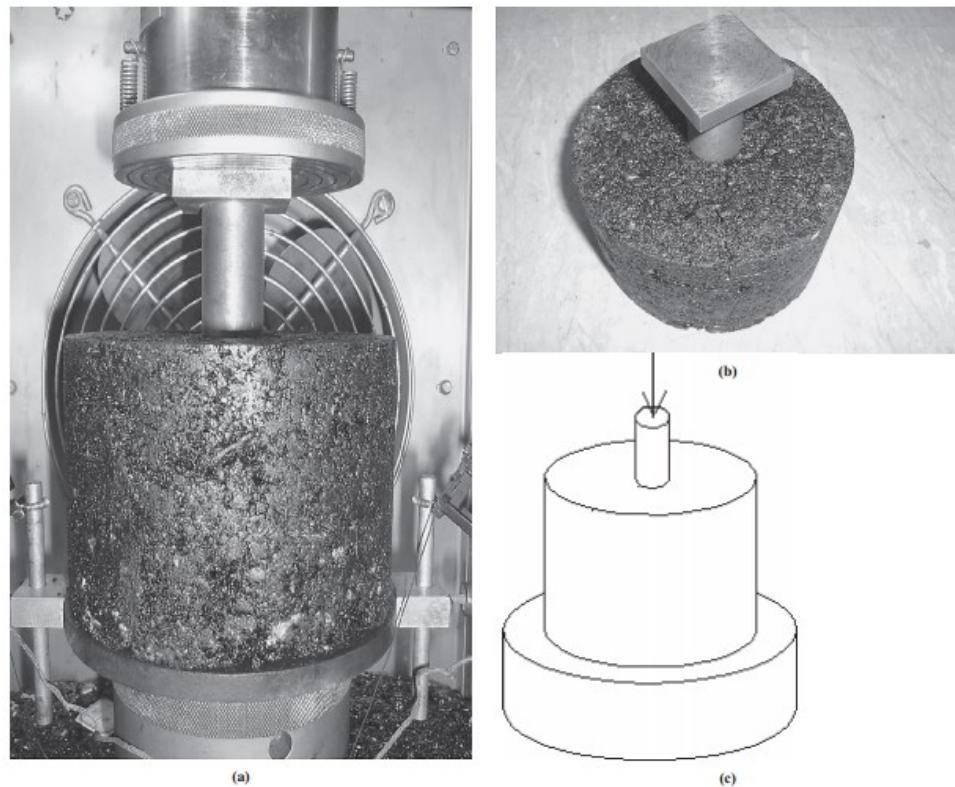
numero di passaggi standard del carico (si è utilizzato un veicolo simulatore denominato APT, Accelerated Pavement Tester). Il macchinario applica una forza di compressione con una velocità di deformazione controllata pari a 1 mm/min, tramite una testa di carico che penetra sulla superficie di un provino cilindrico di diametro 150 mm, condizionato ad una temperatura di 60°C, e il risultato di tale prova è espresso come resistenza a taglio (uniaxial shear resistance) [31,32]:

$$\tau_0 = (0.0023h + 0.117) \times F/A$$

dove:

- $\tau_0$  è il valore di uniaxial shear resistance [MPa];
- F rappresenta il massimo carico assiale applicato durante il test [kN];
- A è l'area della sezione della testa di carico (diametro 42 mm) [mm<sup>2</sup>];
- h è lo spessore del provino [mm].

La figura seguente (fig. 1.62 a-b-c) mostra le caratteristiche dell'apparecchiatura e del provino, utilizzati per l'esecuzione dell'Uniaxial Penetration Test.



**Figura 1.62** : apparecchiatura dell' UPT test



Utilizzando la medesima apparecchiatura, è possibile inoltre indagare il comportamento a fatica da top-down del provino in esame, tramite una prova con applicazioni ripetute del carico [33]. Nel dettaglio, a differenza della procedura descritta in precedenza, il provino viene portato a rottura non con una singola applicazione del carico ma con una sollecitazione ciclica di frequenza pari a 10 Hz, su un provino di dimensioni equivalenti a quello riportato prima. I risultati hanno mostrato come l'innesco e la propagazione della rottura del provino a seguito di tale test presenti caratteristiche simili alla fessurazione riscontrata in sito. Si è notato che all'aumentare del numero di applicazioni del carico, il valore del modulo dinamico di penetrazione (dynamic penetration modulus) subisce un decremento e ciò è consistente con una legge di propagazione sulla lunghezza della fessurazione (figura 1.63). Di seguito, si riporta la formulazione del dynamic penetration modulus, parametro su cui si basa lo studio del TDC attraverso l'esecuzione del Uniaxial Repeated Penetration Test:

$$|E_p^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$$

dove:

- $|E_p^*|$  rappresenta il dynamic penetration modulus;
- $\sigma_0$  è la tensione applicata dalla testa di carico;

$$\sigma_0 = \frac{P}{A}$$

- P è il carico applicato (di valore fissato);
- A è l'area della testa di carico;
- $\varepsilon_0$  è la deformazione verticale.

Da tale elaborazione si vede come l'uniaxial penetration test simuli in modo corretto il processo di decremento del modulo dinamico di penetrazione durante l'innesco e la propagazione del TDC. Il decadimento del valore del modulo è ben correlato con lo sviluppo in lunghezza della fessurazione da top-down (figura 1.64). All'aumentare della regressione del modulo dinamico di penetrazione, il fenomeno di TDC diviene più severo. In particolare, si è visto che lo sviluppo del top-down cracking subisce una netta accelerazione quando il modulo dinamico subisce una riduzione del 66% rispetto al valore iniziale.

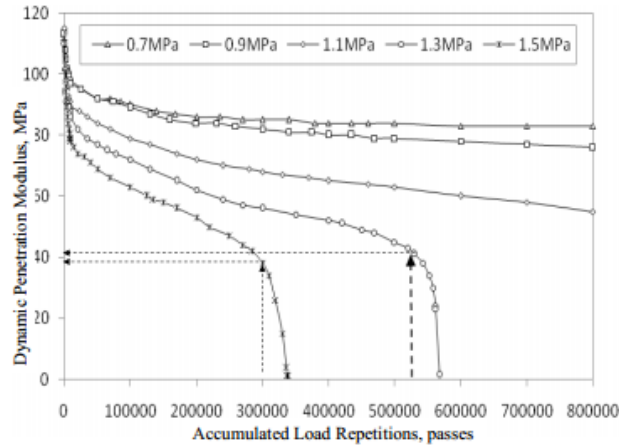


Figura 1.63: andamento del modulo dinamico di penetrazione per diversi valori fissati di carico applicato durante l’UPT

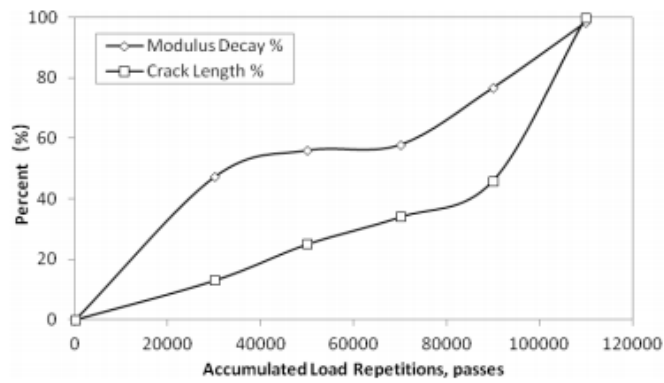


Figura 1.64: correlazione decadimento modulo dinamico- sviluppo superficiale fessurazione da top-down

La validità di tale approccio allo studio del top-down cracking per mezzo dell’apparecchiatura UPT è da ritenersi dubbia poiché, sviluppata presso la Tongji University (Cina), non trova riscontri in letteratura in altre fonti diverse dal luogo di origine. Addirittura, secondo diversi studi, l’Unixial Penetration Test non è propriamente una metodologia di indagine per lo studio del TDC, considerando che in altri documenti [32] presenti in letteratura si cita questo tipo di prova unicamente nell’ambito di studi sulla resistenza della miscela all’ormaiamento.

### Valutazioni conclusive

In conclusione, dalle valutazioni riguardo la validità dell’utilizzo di parametri sperimentali per caratterizzare la resistenza a fessurazione di una miscela, vi sono diverse metodologie di

indagine che descrivono sufficientemente bene il comportamento del conglomerato nei confronti del fenomeno di top-down cracking (non vi è nessuna prova che precisamente risulta sensibile pienamente a tutti i fattori di composizione e di condizionamento della miscela (es. variazione tenore dei vuoti, effetto dell'aging, uso di bitume modificato, aggiunta di RAP e/o RAS, ecc)). In particolare si configurano come validi indici di caratterizzazione i parametri derivanti dall'esecuzione dell'Overlay Test (indice di resistenza NCAT-  $\beta$ ). Inoltre, per i significativi vantaggi in termini di ristretta variabilità dei risultati, costo contenuto dell'apparecchiatura, semplicità e velocità dell'esecuzione del test oltre ad una buona correlazione lineare con i parametri ottenuti dal Texas Overlay Test e NCAT-Modified Overlay Test, l'indice FI (flexibility index), ricavato dalla elaborazione di una prova a flessione su provini semi-circolari, e l'indice CTindex, ricavato da una prova a trazione indiretta, si delineano come valide metodologie alternative, per una descrizione diretta, tramite un unico parametro, della resistenza della miscela al TDC.

Nel seguito si riporta, in forma tabellare, la valutazione sulla sensibilità di diverse metodologie di laboratorio, descritte in precedenza, nei riguardi delle proprietà della miscela che più influenzano la propagazione del TDC (tabella 1.1):

	Aging	Air Voids	Recycled Materials	Modified Binders	Field Correlation
DCSElim					
DCSEmin					
ER					
Texas Overlay Test Nf					
Texas Overlay Test $\beta$					
Texas Overlay Test Gc					
NCAT Modified Overlay Test Nf					
NCAT Modified Overlay Test $\beta$					
NCAT Modified Overlay Test Gc					
Semi- Circular Bend Test					
Illinois Flexibility Index Test					
Indirect Tensile Asphalt Cracking Test					

**Tabella 1.1:** sensibilità all'invecchiamento, tenore dei vuoti, materiale riciclato, utilizzo di bitume modificato e correlazione con i dati osservati in sito, riferiti a diversi indici di laboratorio (in colore verde, i parametri a cui ogni metodologia di prova risulta sensibile)

## 1.7 Interventi di risanamento della pavimentazione

Conoscere al meglio le caratteristiche che contraddistinguono il meccanismo di dissesto di tipo top-down cracking, permette di pianificare interventi mirati e appropriati a tale problematica. Poiché, infatti, la fessurazione da top-down si configura come un meccanismo di rottura della pavimentazione che dalla superficie si propaga verso gli strati legati più profondi, una corretta individuazione può portare alla scelta di un tipo di intervento superficiale. A differenza di meccanismi di rottura classici da fatica degli strati legati di base (bottom-up), non vi è infatti la necessità di asportare e ricostituire tutti gli strati legati in conglomerato bituminoso, ma è sufficiente sostituire gli strati fino ad una profondità di poco superiore a quella della fessura da top-down, sviluppatasi dalla superficie. In tal senso, la fresatura e la nuova stesa di pochi centimetri di conglomerato bituminoso, che interessano lo strato di usura e al più la prima parte dello strato di binder, potrebbero portare ad un completo risanamento della pavimentazione stradale, con vantaggi economici rispetto ad un intervento classico di riabilitazione della sovrastruttura, operato nel caso si fosse riscontrato un'ammaloramento da bottom-up cracking. C'è da sottolineare come l'asportazione del conglomerato danneggiato è un'operazione imprescindibile per la buona riuscita dell'intervento, di qualsiasi tipo specifico esso sia: in caso contrario, si avrebbe infatti un meccanismo di reflective cracking che tenderebbe a risalire in superficie (la fessura coperta da una nuova stesa tende a propagarsi verso la superficie) e un meccanismo di top-down cracking sul nuovo strato steso, incrementato drasticamente dalla presenza di punti critici (le zone danneggiate prima dell'intervento di riabilitazione) in corrispondenza dei quali gli sforzi all'interfaccia pneumatico-pavimentazione subiscono una notevole intensificazione. In aggiunta, trattandosi di un fenomeno localizzato, l'utilizzo di una miscela con ottime proprietà in termini di resistenza alla fessurazione comporta un miglioramento esponenziale nell'esito dell'intervento di riabilitazione della pavimentazione affetta da top-down cracking.

Tramite lo studio di Myers sul calcolo dei fattori K1 di intensificazione degli sforzi, è stato possibile schematizzare e offrire una previsione sull'andamento dello sviluppo della fessura da TDC (sviluppo in profondità) al trascorrere del tempo. Dall'analisi dei diagrammi, si vede come vi sia un primo momento in cui la fessurazione si propaga con notevole velocità verso gli strati più profondi, un periodo intermedio in cui lo sviluppo della cricca rimane bloccato (la propagazione del dissesto ha velocità nulla) e un ultimo intervallo di tempo dove il meccanismo di rottura riacquista elevata velocità e la fessurazione, così sviluppata, arriva ad interessare anche gli strati legati più profondi. È chiaro che, basandosi su tale

schematizzazione, vi sia un periodo preciso (corrispondente all'intervallo di tempo nel quale la fessura arresta momentaneamente il suo sviluppo in profondità), ideale per la corretta individuazione del dissesto e l'esecuzione di un eventuale intervento di risanamento. Ritardare infatti l'intervento su una pavimentazione ammalorata da TDC corrisponde a raggiungere una fase di sviluppo finale del dissesto, schematizzata dal grafico, durante la quale la fessurazione ha ormai raggiunto un livello di danno grave e qualsiasi operazione di miglioramento presenta ormai aspetti non convenienti dal punto di vista economico (figura 1.65).

I fattori di intensificazione degli sforzi sulla pavimentazione variano all'aumentare della profondità della cricca e sono influenzati anche dalla configurazione dei carichi (in particolare load wander), condizioni ambientali e caratteristiche strutturali della sovrastruttura, per cui la schematizzazione precisa, basata sul concetto della variazione di  $K_1$ , presentata in precedenza, varia in base al tipo di pavimentazione [5].

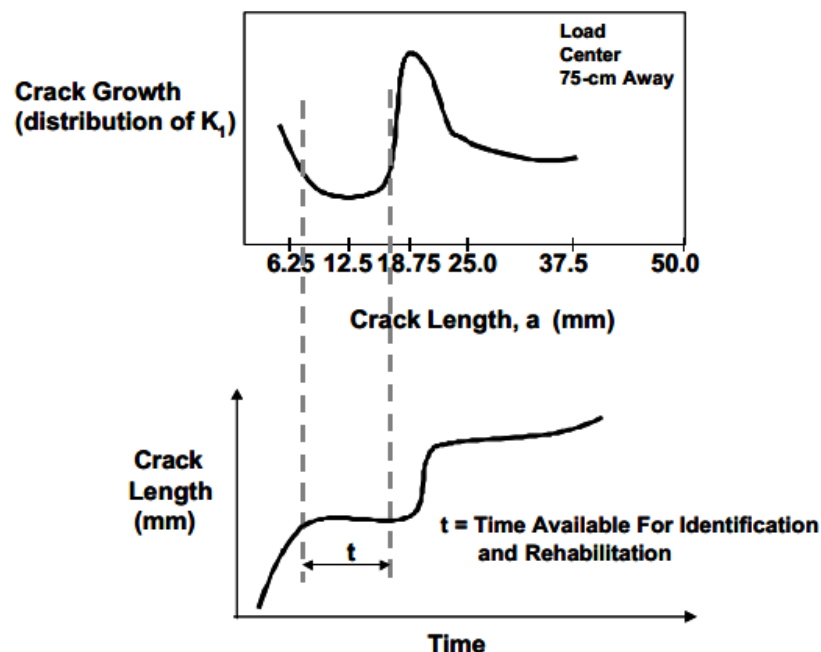


Figura 1.65: sviluppo nel tempo della profondità della fessura da top-down

Tale schematizzazione è quindi specifica e varia in base ai dati di ingresso, ma il concetto generale può essere applicato sommariamente in qualsiasi situazione: in tal senso si è visto, in aggiunta, che nella maggior parte dei casi, il momento ideale per un eventuale intervento di risanamento corrisponde al momento in cui la fessura ha raggiunto una profondità che rientra nell'intervallo tra 6.25 mm e 18.75 mm.

A tal proposito, sono utili eventuali correlazioni tra l'ampiezza e lo sviluppo in profondità della fessura: attraverso mezzi di rilievo manuali e/o automatici dei dissesti sulla superficie della pavimentazione è possibile misurare più o meno accuratamente la larghezza della fessura e tramite correlazioni empiriche conoscere lo stato di sviluppo in profondità di quest'ultima, per conoscere il livello di danno raggiunto e pianificare, dopo un tempo opportuno, un'eventuale opera di risanamento. Di seguito si riporta la correlazione trovata sperimentalmente da Lytton, nell'ambito della ricerca che ha portato alla elaborazione del modello descritto in precedenza [10]:

$$d_c = 5.4 \cdot w^{0.555}$$

dove:

- $w$  rappresenta l'ampiezza della fessura (cm);
- $d_c$  è la profondità della fessura (cm).

## 2. Programma sperimentale

Il caso di studio sviluppato rientra in un più ampio e generale progetto di ricerca mirato all'aggiornamento del sistema di gestione delle pavimentazioni autostradali (PMS), commissionato dalla società Autostrade per l'Italia S.p.A. (ASPI). Tale esigenza è motivata dal riscontro di un più rapido tasso di degrado manifestato negli ultimi anni nelle pavimentazioni della rete autostradale, con ripercussioni economiche per la società concessionaria. La manutenzione in esercizio delle pavimentazioni assume sempre più rilevanza nel perseguimento di una corretta pianificazione degli interventi periodici di risanamento, permettendo un'ottimizzazione dei tempi e dei costi di intervento nel rispetto di standard di qualità prefissati. Soprattutto in ambito autostradale, a causa del traffico veicolare pesante e dell'utilizzo di nuovi materiali stradali all'avanguardia, il rischio che un piano di manutenzione stradale, basato su metodi di dimensionamento ormai anacronistici, sia ormai obsoleto, risulta concreto. In tal senso, questo lavoro è mirato a confluire in un PMS personalizzato in funzione delle esigenze di ASPI, integrando quelle pratiche attuali che risultano ancora valide. Nel dettaglio, il programma di aggiornamento si attua in due step successivi: una prima fase conoscitiva e una seconda fase applicativa, mirata alla realizzazione di uno strumento software in cui saranno implementate le metodologie di controllo e manutenzione sviluppate.

Lo studio in esame rientra nella prima fase conoscitiva, indirizzata all'acquisizione dei dati necessari per l'implementazione di un moderno PMS e all'approfondimento delle problematiche che determinano il deterioramento della pavimentazione (in termini di leggi di decadimento in funzione del traffico e delle caratteristiche dei materiali) secondo modalità finora ignorate, a causa dell'evoluzione sia nel settore dei trasporti che nell'ingegneria dei materiali e delle sovrastrutture stradali.

L'elaborazione di un nuovo piano di manutenzione della pavimentazione è attuato, in particolare, per mezzo di:

- una integrazione degli indicatori di stato relativi ad aderenza, macro-tessitura e regolarità con misure di portanza ad alto rendimento (e.g. RAPTOR) e un aggiornamento del "catasto" relativo alle stratigrafie delle pavimentazioni con apparecchiatura Georadar;

- un monitoraggio dei veicoli commerciali per l'aggiornamento degli spettri di traffico relativi alle diverse tipologie di tratte autostradali (carreggiate a 2, 3 e 4 corsie);
- un rilievo “visivo” automatico dei dissesti con focus dedicato al dissesto top-down cracking, finalizzato alla definizione di leggi di decadimento in funzione del traffico (verosimilmente espresso in passaggi di pneumatici singoli maggiorati) al variare della tipologia di pavimentazione e/o materiali.

L'indagine sperimentale, qui presentata, si configura come uno sviluppo specifico dell'ultimo punto, finalizzata ad uno studio preliminare sulla caratterizzazione fenomenologica della fessurazione da top-down nella rete autostradale italiana: occorre elaborare una metodologia valida per il rilievo del top-down cracking in sito e una procedura di analisi sperimentale in grado di considerare i parametri determinanti per la resistenza a fessurazione del conglomerato.

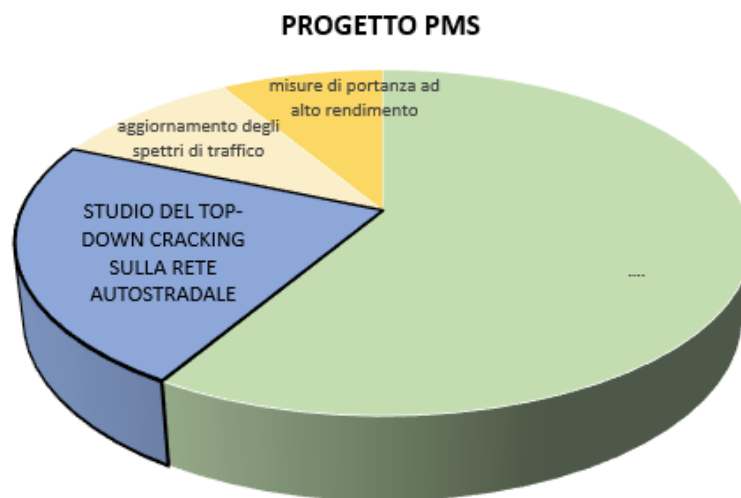


Figura 2.1: configurazione della ricerca finalizzata all'aggiornamento del PMS autostradale

Nel dettaglio, il programma sperimentale sviluppato può essere diviso in due fasi: nella prima parte si è eseguito un monitoraggio della rete autostradale e in particolare un rilievo del dissesto da top-down cracking sulla pavimentazione, con lo scopo di valutare dei criteri utili alla corretta identificazione di tale tipologia di dissesto; in una seconda fase si è proceduto, tramite metodologie di laboratorio, all'analisi di campioni affetti da top-down



prelevati in sito, al fine di caratterizzare l’innescò e la propagazione del fenomeno sulle pavimentazioni autostradali, e in particolare fornire delle linee guida utili per descrivere i fattori che regolano la resistenza alla fessurazione superficiale (figura 2.2).

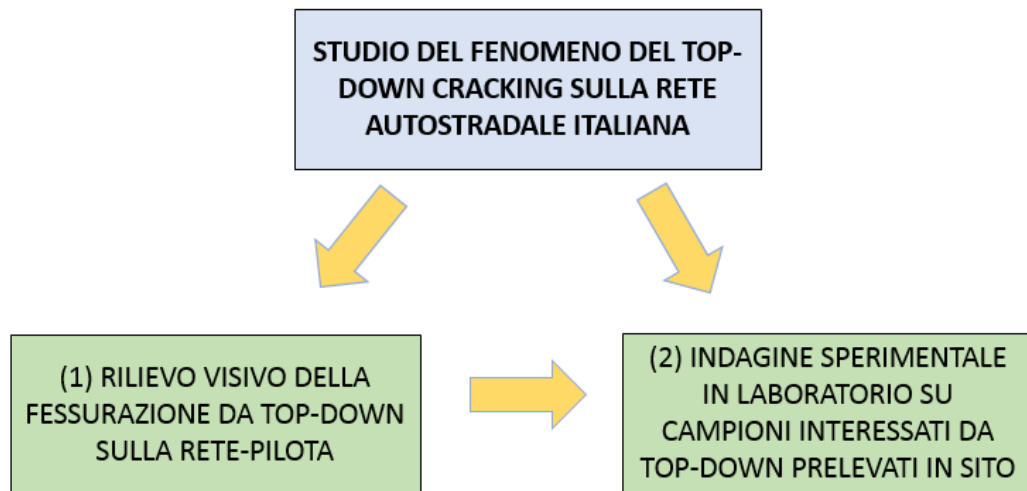


Figura 2.2: schematizzazione del programma di ricerca sviluppato

## 2.1 Rilievo del dissesto da top-down cracking sulla rete autostradale italiana

Come anticipato in maniera schematica nelle righe precedenti, in una prima fase del programma sperimentale sviluppato in tale sede, si è proceduto all’esecuzione di un rilievo della presenza della fessurazione da top-down cracking su una porzione della rete gestita da Autostrade per l’Italia S.p.A., appositamente selezionata come rete-pilota per l’elaborazione dello studio.

### *Descrizione della rete-pilota*

Per lo svolgimento del progetto di ricerca, finalizzato all’elaborazione di un PMS aggiornato e personalizzato per le problematiche e le esigenze specifiche della rete gestita da ASPI, si è individuata una porzione di rete significativa, considerata come “rete-pilota”, all’interno

della quale le tratte selezionate vengono ritenute rappresentative, al fine di estrapolare all'intera rete eventuali risultati e metodologie adottate.

Nel dettaglio sono state individuate le tratte autostradali riportate nella tabella seguente (tabella 2.1), dove viene indicato, per ogni segmento, la direzione di tronco di competenza, le chilometriche e l'estensione:

TRATTE INDIVIDUATE PROGETTO PMS						
DT	Autostrada	Tratta	km		carreggiate	km rete
			da	a		
DT3	A1 MILANO -NAPOLI	Ponte Fiume Enza - Allacc. A14	119+500	188+900	Nord/Sud	69,4
DT3	A14 BOLOGNA-TARANTO	Allacc. Dir. Ravenna - Cattolica	56+700	143+900	Nord/Sud	87,2
DT3	A14 DIRAMAZIONE RAVENNA	All. A14 - S.S. Romea	0+000	29+800	Est/Ovest	29,8
DT4	A1 MILANO-NAPOLI	Sasso Marconi - Allacc. Variante di Valico	210+100	220+000	Nord/Sud	9,9
<b>TOT</b>						<b>196,3</b>

**Tabella 2.1:** tratti della rete-pilota individuata nell'ambito del progetto finalizzato all'aggiornamento del PMS per ASPI

Si tratta di segmenti autostradali differenti per caratteristiche geometriche del tracciato (in particolare numero di corsie) e volumi di traffico interessati. In particolare, in tal senso, per ogni tratta selezionata si è riportato, in forma tabellare, il livello di traffico (dal punto di vista qualitativo) correlato, il numero di corsie per ogni carreggiata, ed eventuali note supplementari, tutte informazioni utili per la comprensione delle operazioni di analisi svolte nel seguito (tabella 2.2):

Autostrada	Tratta	Livello di traffico	Numero di corsie per carreggiata	Note supplementari
A1 MILANO-NAPOLI	Ponte Fiume Enza - Allacc. A14	elevato	3 (km 119+500 - 155+500 ) 4 (km 155+500 - 188+900)	
A14 BOLOGNA-TARANTO	Allacc. Dir. Ravenna - Cattolica	medio	3	
A14 DIRAMAZIONE RAVENNA	All. A14 - S.S. Romea	basso	2	
A1 MILANO-NAPOLI	Sasso Marconi - Allacc. Variante di Valico	basso	3	strato di usura chiuso

**Tabella 2.2:** caratteristiche delle tratte autostradali individuate per l'analisi

Di seguito vengono presentate le localizzazioni specifiche dei segmenti autostradali selezionati per il progetto di ricerca: si tratta di una rete-pilota di un'estensione di circa 400 km (considerando entrambe le carreggiate di percorrenza) che si sviluppa a modo di grafo attorno a Bologna (figura 2.3 a-b-c-d-e), una porzione comunque significativa considerando che l'estensione totale della rete gestita da ASPI è di circa 3000 km.



Figura 2.3-a: visione generale delle rete-pilota (colore blu), considerata nello studio in esame



Figura 2.3-b: tratto Ponte Fiume Enza- Allacciamento A14 (A1 MILANO-NAPOLI) [carreggiata a quattro corsie (verde), carreggiata a tre corsie (giallo), carreggiata a due corsie (arancione)]

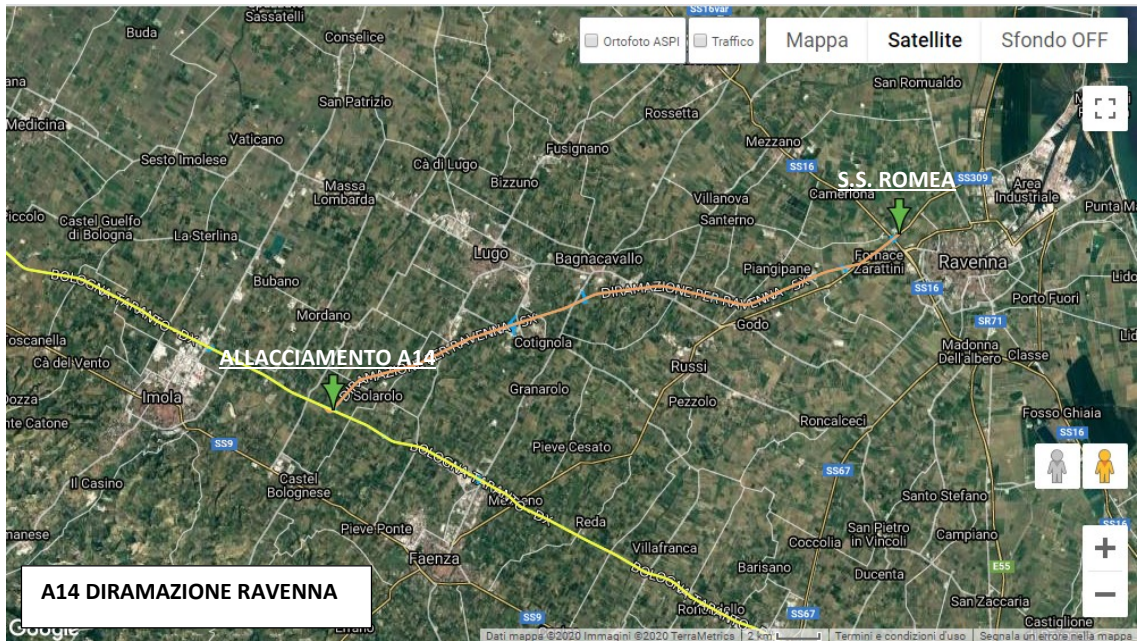


Figura 2.3-c: tratto Allacciamento A14 – S.S. Romea (A14 DIRAMAZIONE RAVENNA) [carreggiata a quattro corsie (verde), carreggiata a tre corsie (giallo), carreggiata a due corsie (arancione)]

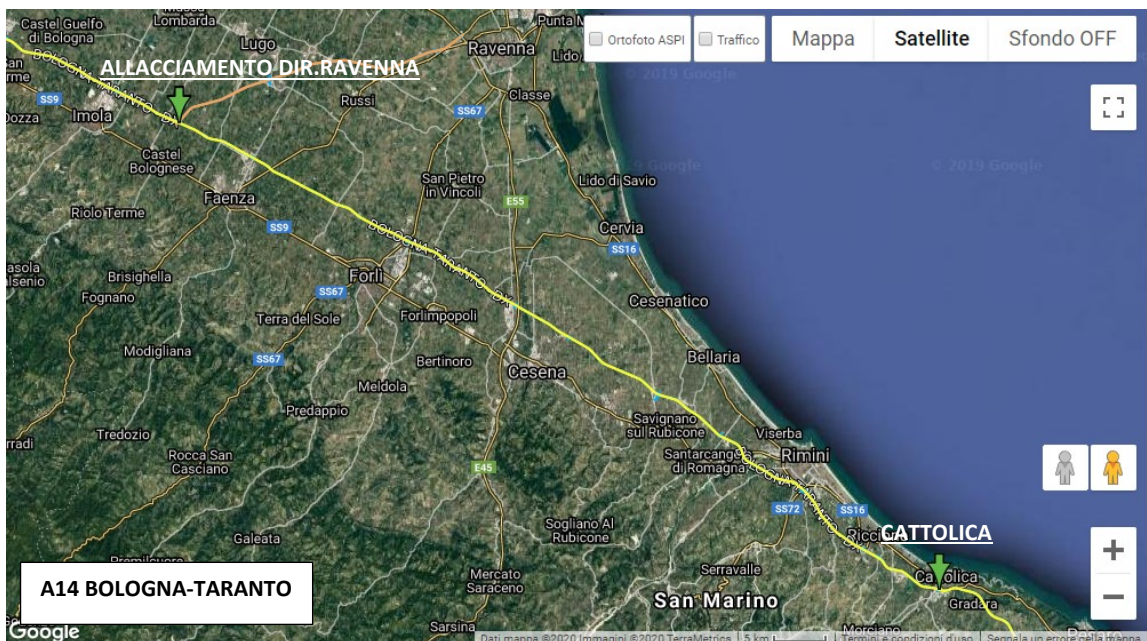


Figura 2.3-d: tratto Allacciamento Diramazione Ravenna – Cattolica (A14 BOLOGNA - TARANTO) [carreggiata a quattro corsie (verde), carreggiata a tre corsie (giallo), carreggiata a due corsie (arancione)]

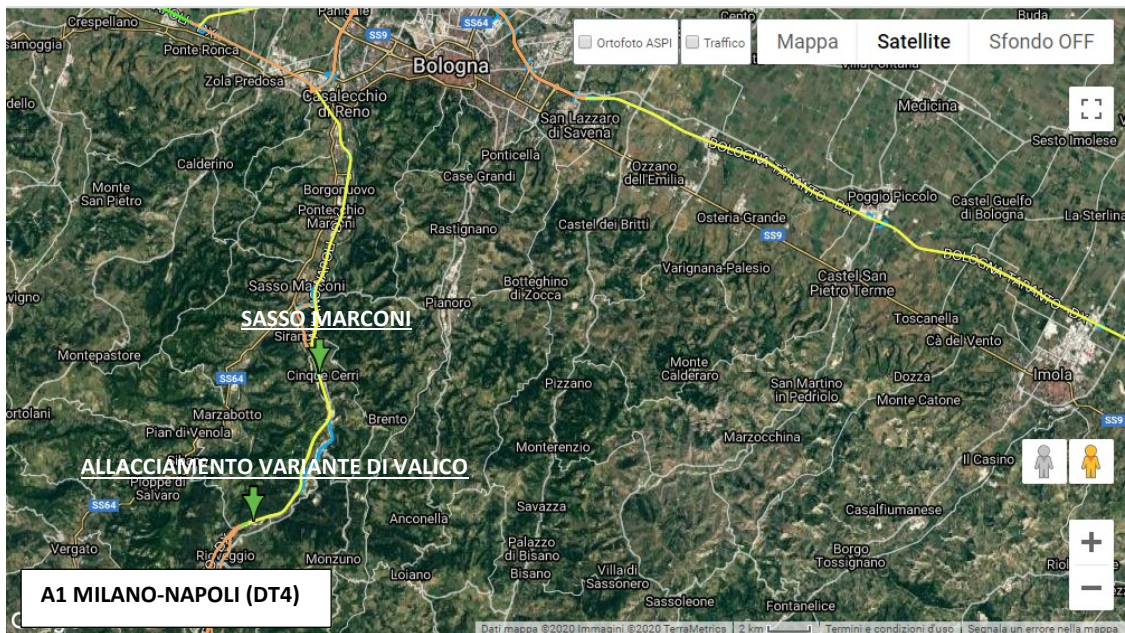


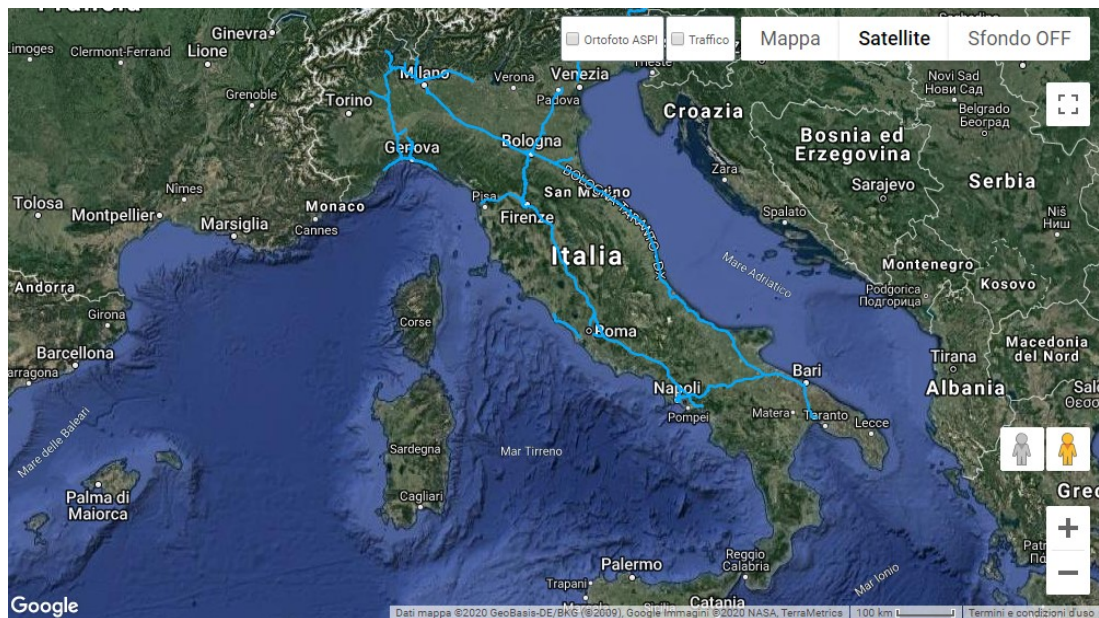
Figura 2.3-e: tratto Sasso Marconi – Allacciamento Variante di Valico (A1 MILANO - NAPOLI) [carreggiata a quattro corsie (verde), carreggiata a tre corsie (giallo), carreggiata a due corsie (arancione)]

### *Monitoraggio della rete*

Nell’ambito della prima fase conoscitiva del programma finalizzato all’aggiornamento del “Pavement Management System” appositamente personalizzato per Autostrade per l’Italia S.p.A., l’indagine qui presentata è mirata al monitoraggio delle rete autostradale e al rilievo dei dissesti della pavimentazione, con particolare riferimento alla fessurazione da top-down. Prima di un eventuale rilievo dei dissesti con apparecchiature automatiche (non trattato in tale ambito di studio), si è proceduto ad un monitoraggio visivo della rete-pilota, descritta in precedenza, con l’obiettivo di trovare dei criteri utili per la corretta individuazione del top-down cracking in sito. All’interno di un piano periodico di rilievo visivo dei dissesti della pavimentazione, è importante utilizzare delle linee guida al fine di riconoscere le varie tipologie di fessurazione superficiale, e in particolar modo saper distinguere il tipo di dissesto da top-down cracking rispetto a fessure superficiali dovute allo strisciamento del cerchione a seguito della foratura di uno pneumatico di un mezzo pesante.

A tale scopo, si è fatto largo uso di un software (“Google Earth Enterprise per Autostrade”), implementazione del sistema Google Earth per ASPI, concesso dal gestore autostradale (sono richieste infatti delle credenziali di accesso), in cui si ha una visione della totalità della rete autostradale italiana, gestita da Autostrade per l’Italia, e in qualsiasi località, è possibile

filtrare informazioni riguardo lavori in corso, dati di incidentalità, caratteristiche del tracciato (numero di corsie, ecc.), informazioni sulle opere d'arte e molto altro (figura 2.4). Le stesse immagini, presentate in precedenza per la descrizione della rete-pilota di riferimento, sono state prelevate dal medesimo software.



**Figura 2.4:** finestra principale del software “Google Earth Enterprise per Autostrade”, utilizzato nell’indagine sperimentale presentata, in cui è visibile la panoramica generale della rete autostradale gestita da ASPI

In particolare, per il rilievo visivo della fessurazione longitudinale dovuta al fenomeno di fatica da top-down, si sono utilizzate le immagini di output dell’ARAN View (figura 2.5), apparecchiatura che durante le operazioni di rilevamento della regolarità della superficie della pavimentazione autostradale (tramite parametro IRI, International Roughness Index), acquisisce tramite una camera georeferenziata, fotogrammi della pavimentazione stradale con passo di circa 5 metri. Tale rilievo della regolarità, e quindi acquisizione delle immagini, è operata su tutta la rete autostradale di ASPI, e le immagini così acquisite sono visionabili tramite il software presentato in precedenza. È possibile selezionare direttamente, tramite l’inserimento della direzione di tronco di competenza e delle chilometriche di estremità, il segmento di interesse e avere l’opportunità di visionare i fotogrammi secondo due diverse angolazioni, riferite alla corsia di marcia destra. La finestra di interfaccia permette inoltre di cambiare l’anno di riferimento, e quindi di poter visionare anche immagini acquisite in campagne di rilievo passate, per lo stesso punto di interesse, cercare direttamente una

chilometrica in particolare, oppure tramite l'utilizzo delle frecce direzionali, scorrere i fotogrammi in ordine (figura 2.6).



Figura 2.5: apparecchiatura ARAN (Automatic Road Analyzer)

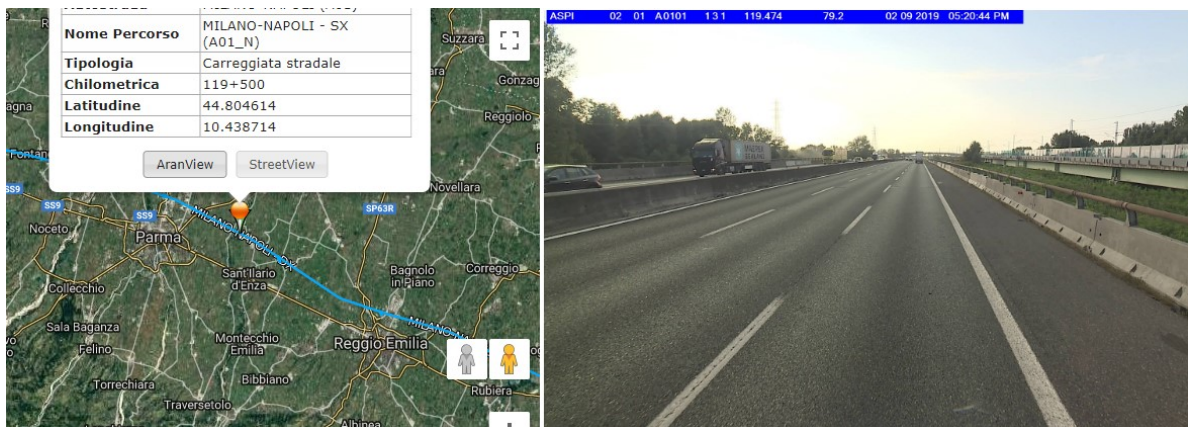


Figura 2.6: finestra relativa ai fotogrammi acquisiti dall'ARAN durante il rilievo della regolarità della superficie

Tramite la visione dei fotogrammi (risalenti a Maggio 2019), si è proceduto al rilievo della fessurazione longitudinale, ascrivibile alla tipologia di rottura da top-down (confermata a posteriori dall'estrazione di diversi provini in sito), nei quattro tratti individuati della rete-pilota per entrambe le carreggiate di marcia, limitatamente alla corsia di marcia destra, maggiormente interessata dal traffico pesante (in totale circa 400 km di tratto autostradale). In particolare, per ogni tratto e per ogni direzione, si è registrata l'estensione (chilometrica di inizio e chilometrica di fine) del dissesto longitudinale osservato, a cui è stato associato una misura di gravità, in tre livelli, secondo criteri stabiliti a priori, in modo qualitativo (figura 2.7):

- *LIVELLO DI DANNO 1* (lieve) - presenza di una singola fessura longitudinale poco percepibile o comunque caratterizzata da un'ampiezza contenuta;
- *LIVELLO DI DANNO 2* (medio) – presenza di una singola fessura longitudinale caratterizzata da un'ampiezza rilevante oppure presenza di una serie di fessure (due o più) in direzione longitudinale, parallele tra loro;
- *LIVELLO DI DANNO 3* (grave) – presenza di una fessurazione longitudinale che interessa l'intera striscia di impronta dello pneumatico e che visivamente presenta caratteristiche speculari ad una fessurazione “a ragnatela” (la fessurazione da top-down evolve in una fessurazione di tipo “alligator cracking”, una serie di fessure longitudinali di notevole lunghezza si uniscono tra loro tramite fessure trasversali).

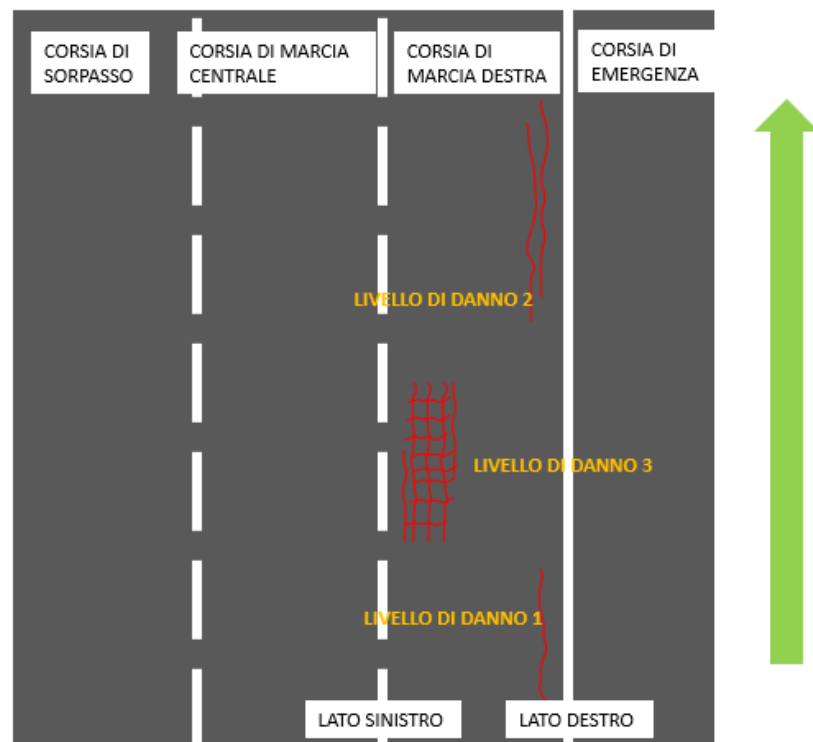


Figura 2.7: schematizzazione dei tre differenti livelli di danno associati alla fessurazione da top-down rilevata

In aggiunta, si è differenziata la fessurazione da top-down rilevata sulla striscia di impronta dello pneumatico destro (lato destro) e il dissesto osservato in corrispondenza della striscia di impronta sinistra (lato sinistro) e sono state riportate eventuali note complementari (ad esempio il caso del rilievo di una fessura superficiale causata dallo strisciamento del cerchione di un mezzo pesante a seguito della foratura dello pneumatico) e i fotogrammi

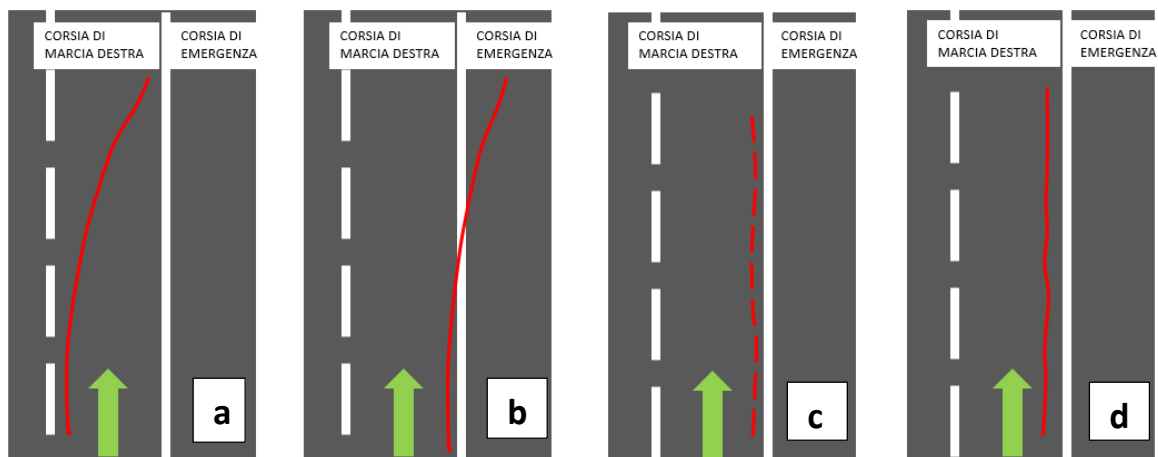


relativi a ciascun punto rilevato (tabella 2.3). Sebbene, infatti, visivamente appaiano tutte come fessure longitudinali superficiali, talvolta è facile riconoscere il dissesto provocato dalla foratura dello pneumatico di un veicolo: infatti a differenza di fessure da top-down che si sviluppano in direzione longitudinale mantenendo una distanza dalla linea di margine pressoché costante, le fessure innescate dallo strisciamento di un cerchione sono caratterizzate da un tipico andamento che generalmente devia verso destra (a causa della manovra del mezzo che tende ad accostarsi) oppure sono visibili a tratti per il fatto che l'asportazione della gomma della ruota non è completa e il cerchione arriva al contatto con la pavimentazione in modo discontinuo (figura 2.8). Tuttavia ci sono altresì numerosi casi nei quali risulta complesso operare una distinzione tra la fessurazione dovuta alla foratura di uno pneumatico e il top-down cracking, poiché su grande scala, l'andamento della fessurazione, a differenza della situazione illustrata in figura 2.8, presenta un andamento simile (pseudo-rettilineo parallelo alla linea di margine).

Da tali osservazioni, sono scaturiti diversi studi statistici descrittivi della presenza della fessurazione da top-down sulla rete autostradale. L'elaborazione statistica sviluppata è stata rivista in un secondo momento alla luce dei criteri guida trovati, utili al corretto riconoscimento della fessurazione da top-down rispetto a fessure superficiali, visivamente analoghe, ma di tipologia diversa (giunti di stacca, reflective cracking, fessurazione dovuta a foratura di uno pneumatico).

A1 MILANO -NAPOLI km 119+500 - km 188+900 DIREZIONE NORD					
INIZIO DISSESTO	FINE DISSESTO	LATO dx/sx	LIVELLO DI DANNO	NOTE	SCREEN
188+900	188+650	dx	1	inizio rilievo in prossimità del passaggio ad altra corsia per aumento corsie di marcia	1
188+644	188+539	dx	2	iniziale di fessurazione tipo "alligator cracking" / presenza di una seconda fessurazione al centro	2
188+535	188+268	dx	1	fine rilievo del tratto dovuto a passaggio ad altra corsia per aumento corsie di marcia	3
188+063	188+018	dx	1		4
187+319	187+104	dx	1	fessura dovuta a foratura pneumatico	5
186+369	186+300	dx	2	stadio iniziale di fessurazione tipo "alligator cracking"	6
186+369	186+300	sx	2	stadio iniziale di fessurazione tipo "alligator cracking"	7
186+230	185+989	dx	1		8
185+794	185+559	dx	1		9
184+233	184+188	dx	1		10
184+233	184+188	sx	1		11
184+024	183+844	dx	1		12
183+984	183+550	sx	1	individuabile a tratti	13

Tabella 2.3: estratto del foglio di calcolo Excel utilizzato per la raccolta dei dati



**Figura 2.8:** fessure causate dallo strisciamento del cerchione di un mezzo pesante a seguito della foratura dello pneumatico: andamento che devia verso la corsia di emergenza (a-b); andamento a tratti (c); fessura standard da top-down (d)

### *Campagna di rilievo*

Al fine di trovare un riscontro tra i risultati del rilievo visivo operato e la situazione in sito (propagazione della fessura all'interno degli strati legati) si è programmata una ampia campagna di prelievo lungo la rete-pilota considerata. I punti di campionamento sono stati appositamente selezionati per avere a disposizione diversi punti caratterizzati da età, e quindi numero di passaggi veicolari transitati, differenti al fine di studiare come due fattori come l'età (correlata al fenomeno di aging) e il carico da traffico possano essere determinanti per una corretta valutazione delle caratteristiche prestazionali della pavimentazione nei riguardi del top-down cracking.

Il campionamento in sito è mirato inoltre all'elaborazione preliminare di una metodologia valida, applicabile nell'ambito di ricerche future, finalizzate alla definizione di una legge di propagazione del top-down cracking (verosimilmente espresso tramite lo sviluppo della fessura in profondità) al variare dell'età della pavimentazione in esame (e quindi del traffico transitato in quel dato lasso temporale). Utilizzando i dati di età del rifacimento della pavimentazione per ogni segmento esaminato visivamente, forniti direttamente da Autostrade per l'Italia, è stato possibile associare ogni tratto in cui è stato rilevato un dissesto di tipo longitudinale al dato di età del manto di usura corrispondente. Da ciò, con lo scopo di avere a disposizione diversi dati per l'elaborazione di un'eventuale legge di decadimento per il dissesto da TDC, sono stati selezionati diversi punti di prelievo caratterizzati da

fessurazione da top-down, confermata dall'esame visivo, e da diversi valori di età della pavimentazione (e quindi da diverso numero di passaggi di assi pesanti nel periodo temporale intercorso dalla stesa al momento del rilievo della fessura (fotogrammi Maggio 2019)). Per il prelievo dei campioni in sito è stato necessario operare un restringimento di corsia nelle ore notturne, segnalato adeguatamente e preventivamente con apposita segnaletica stradale; per ogni segmento autostradale della rete-pilota, la scelta sui punti in cui poter estrarre dei campioni è stata condizionata sia da motivi di studio, ma anche da motivi di carattere pratico di cantiere, quali:

- possibilità di avere a disposizione il maggior numero di punti di prelievo, per ogni tratto autostradale, e per ogni carreggiata, caratterizzati da età dello strato drenante differente;
- selezionare, nel maggior numero di casi possibili, punti consecutivi in modo da operare un unico restringimento di corsia (estensione massima di circa 2 km) per la raccolta di più carote;
- non considerare parti del tracciato in curva, per eliminare l'influenza della componente inerziale sulla trasmissione del carico sulla pavimentazione;
- non considerare tratti (caratterizzati da una certa età della pavimentazione) poco estesi (estensione minore di 200 m) poiché, considerando un normale sfasamento nelle progressive registrate dal sistema ARAN (per mezzo del quale è stato effettuato il rilievo visivo dei dissesti) e le chilometriche indicate dalla segnaletica in sito, c'è il rischio di non prelevare il campione nella localizzazione corretta;
- considerare tratti caratterizzati da una fessurazione chiara, per facilitare le operazioni di individuazione agli addetti, nelle ore notturne;
- escludere i punti di prelievo delle zone fessurate nella striscia di impronta dello pneumatico sinistro, per studiare unicamente la propagazione in un unico lato e per facilitare le operazioni di cantiere (restringimento della carreggiata);
- scartare i tratti interessati da una nuova stesa della pavimentazione realizzata dopo la data dei fotogrammi a cui si è fatto riferimento per il rilievo visivo (prima parte dell'anno 2019), poiché di fatto la fessurazione non è più presente in sito e quindi non è più possibile campionarla;
- scartare i tratti nei quali risulta chiaro a priori (figura 2.8) che la fessurazione superficiale è causata dallo strisciamento del cerchione a seguito di una foratura di uno pneumatico (andamento spiccatamente non rettilineo e parallelo).

Nelle tabelle seguenti (tabella 2.4 e tabella 2.5) si riportano estratti del foglio Excel, utilizzati per la progressiva selezione dei punti di prelievo, sopra descritta. Per motivi di lunghezza espositiva, non si riportano le tabelle riferite ai quattro tratti autostradali della rete-pilota analizzati, ma solo una parte correlata ad un singolo segmento e ad una singola direzione di marcia, a titolo esemplificativo.

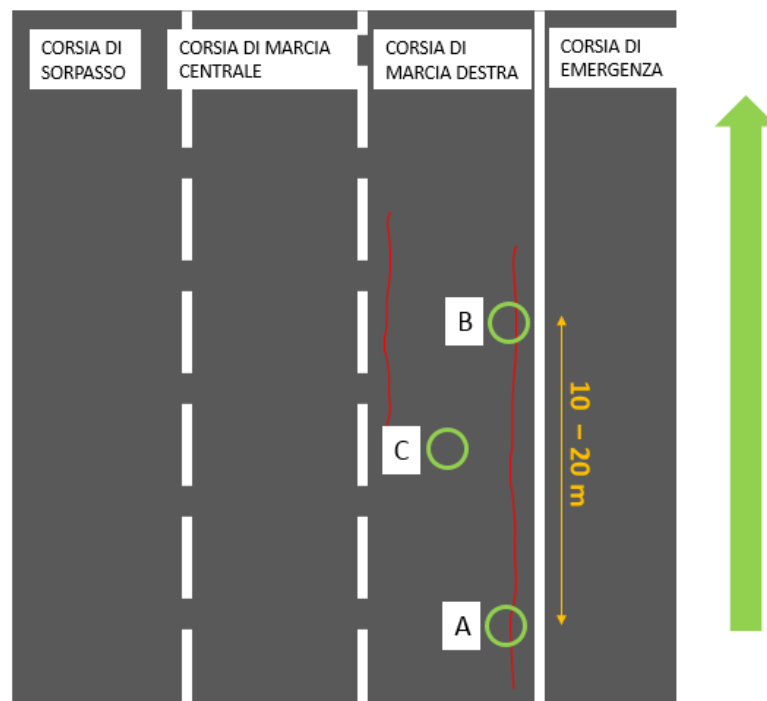
A1 MILANO - NAPOLI km 119+500 - km 188+900 DIREZIONE SUD (tratto a 4 corsie)							
	DISSESTO LATO DX		DISSESTO LATO SX	TIPO DI MISCELA			ANNO DI COSTRUZIONE
inizio dissesto	155+361			DREN	155 + 374	155 + 381	15/09/2006
				DREN	155 + 381	155 + 607	04/10/2013
				DREN	155 + 607	155 + 618	27/10/2013
fine dissesto	155+769			DREN	155 + 618	155 + 856	30/05/2018
	156+089						
	156+220						
inizio dissesto	156+399			DREN	156 + 400	156 + 705	05/05/2011
		inizio dissesto	156+447	DREN	156 + 705	157 + 043	28/07/2017
fine dissesto	156+773			DREN	157 + 043	157 + 600	27/07/2017
		fine dissesto	157+338				
	157+697						
	157+782						
	157+859						
	158+033						

**Tabella 2.4:** dati dell'età della pavimentazione forniti da ASPI, in riferimento ai tratti individuati nell'ambito del rilievo visivo del TDC

A1 MILANO-NAPOLI DIREZIONE SUD (tratto a 4 corsie) km 155+700 - 188+900														
DISSISTO			PAVIMENTAZIONE				TRATTI IN CURVA DA ESCLUDERE		NOTE		RIPILOGO POSSIBILI PUNTI DI PRELIEVO			
estensione	dissesto	livello di danno	lato dx/sx	inizio tratto	fine tratto	anno di stesa	tipo di miscela				inizio tratto	fine tratto	anno di stesa	estensione [m]
inizio	156.399		M	156.400	156.705	2011	DREN			posizione della fessura inusuale	156.400	156.705	2011	305
fine	156.773													
inizio	158.274			158.278	158.673	2006	DREN				158.278	158.673	2006	395
				158.711	159.097	2006	DREN			posizione della fessura inusuale	158.711	159.097	2006	386
			M	159.130	159.620	2006	DREN				159.130	159.620	2006	490
fine	159.866			159.620	159.866	2006	DREN				159.620	159.866	2006	246
inizio	160.001			161.002	161.851	2006	DREN				161.002	161.851	2006	480
fine	161.862									161,482 - 161,862				
inizio	163.009			163.009	163.571	2006	DREN				163.009	163.571	2006	562
fine	164.035		M	163.602	164.035	2006	DREN				163.602	164.035	2006	433
inizio	165.458			165.800	166.473	2006	DREN				165.800	166.473	2006	673
				166.781	167.225	2006	DREN				166.781	167.225	2006	444
fine	169.013		M	167.252	168.727	2006	DREN				167.252	168.727	2006	1475
inizio	169.339			169.447	169.900	2006	DREN				169.447	169.900	2006	453
			M	169.900	170.243	2006	DREN				169.900	170.243	2006	343
fine	170.491			170.261	170.491	2006	DREN				170.261	170.491	2006	230
inizio	170.661			170.665	171.090	2016	DREN				170.665	171.090	2016	425
fine	171.178		L											
inizio	171.183			171.193	171.385	2013	DREN				171.193	171.385	2013	192
fine	171.385		G											
inizio	171.390			171.571	171.991	2015	DREN			posizione della fessura inusuale	171.571	171.991	2015	420
fine	171.991		L											
inizio	172.138			172.138	172.345	2015	DREN				172.138	172.345	2015	207
fine	174.581		L	172.401	174.581	2015	DREN				172.401	174.581	2015	2180
inizio	175.157			175.164	175.606	2015	DREN				175.164	175.746	2015	582
fine	176.210		L	175.606	176.204	2015	DREN			175,746 - 176,210				
inizio	177.007			177.180	177.479	2006	DREN				177.180	177.479	2006	299
fine	177.479		M											
inizio	178.660			178.712	179.013	2015	DREN				178.712	179.013	2015	301
			L	179.410	179.895	2016	DREN				179.410	179.895	2016	485
fine	180.188			179.895	180.203	2015	DREN				179.895	180.203	2015	308
inizio	182.435			182.215	183.913	2016	DREN				182.215	183.913	2016	1698
fine	182.802		L											
inizio	184.284			184.288	184.755	2017	DREN				184.288	184.755	2017	
fine	185.326		L	184.781	185.095	2017	DREN			possibile giunto				

Tabella 2.5: foglio elettronico utilizzato per la selezione dei possibili punti di prelievo

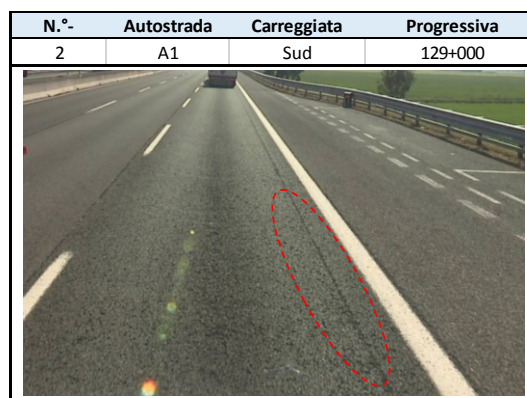
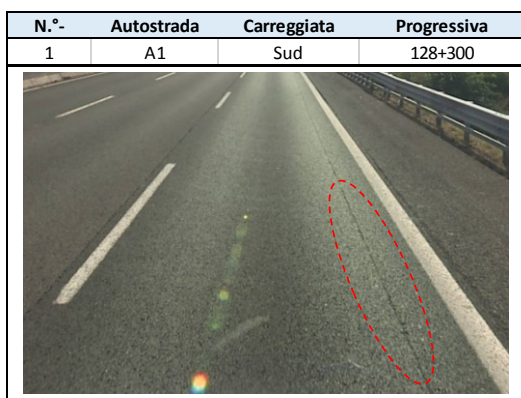
Da tale processo graduale di selezione, si è convenuto, a seguito di uno scambio di pareri direttamente con Autostrade per l'Italia, all'individuazione di 23 punti di prelievo. Nel dettaglio per ogni punto di prelievo, scelto tra i tratti soggetti a fessurazione superficiale segnalati nell'analisi visiva sulla corsia di marcia destra della rete-pilota, sono stati eseguiti 2 carotaggi (a circa 10-20 m di distanza l'uno dall'altro) in corrispondenza del difetto longitudinale per tutto lo spessore degli strati legati ed un carotaggio sul solo strato di usura drenante, prelevato in un punto dove la pavimentazione non risulta ammalorata (verosimilmente centro corsia, non interessata dall'interazione diretta con lo pneumatico) (figura 2.9). Nel seguito si riporta, in forma tabellare, una panoramica dei punti di prelievo scelti: in particolare è stato escluso dalla campagna di carotaggio il tratto esaminato dell'A1 MILANO-NAPOLI (Sasso Marconi – Allacciamento Variante di Valico) poiché caratterizzato da uno strato di usura chiuso (tratto di montagna), non soggetto a particolari problemi nei riguardi del TDC, e il tratto esaminato della A14 DIRAMAZIONE RAVENNA poiché caratterizzato da una sporadica presenza di fessurazione da top-down (livello di traffico poco elevato) (tabella 2.6, tabelle 2.7).

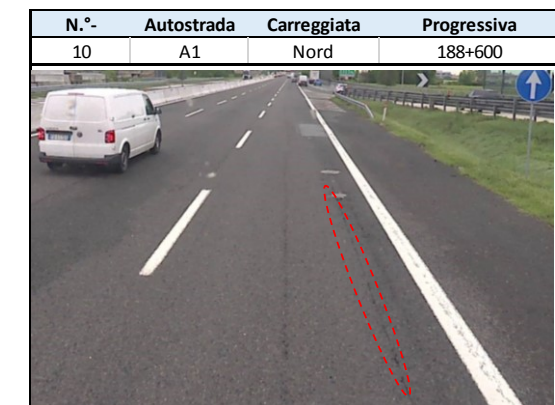
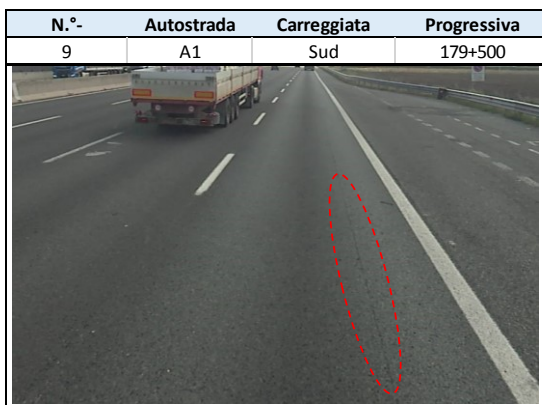
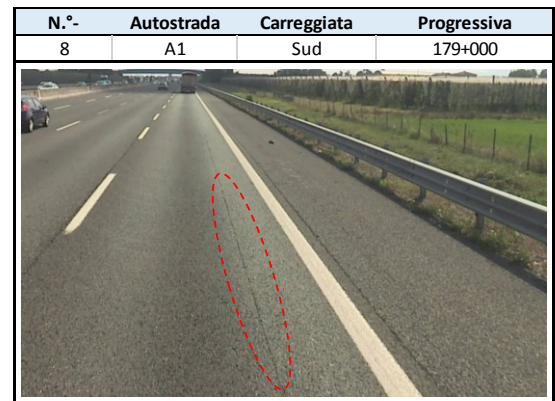
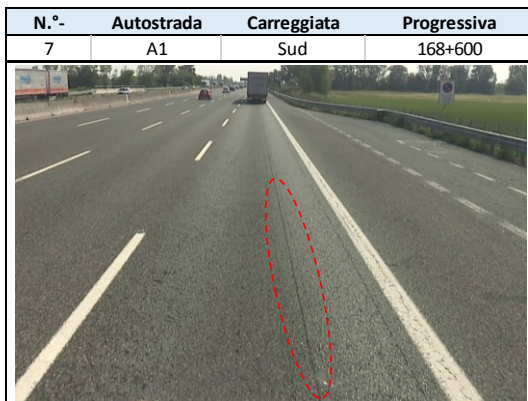
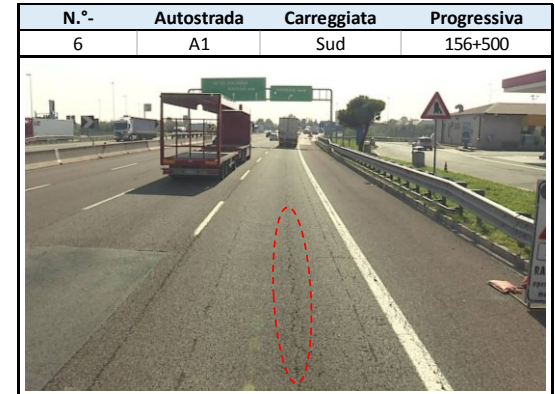
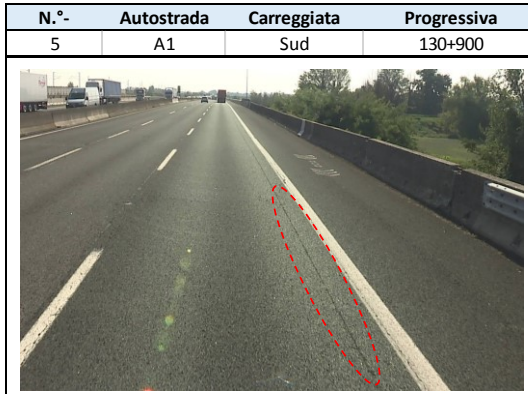
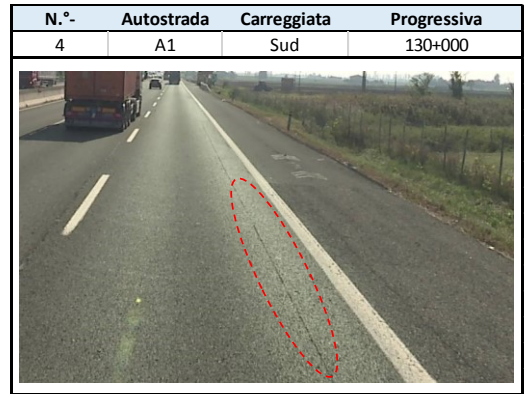
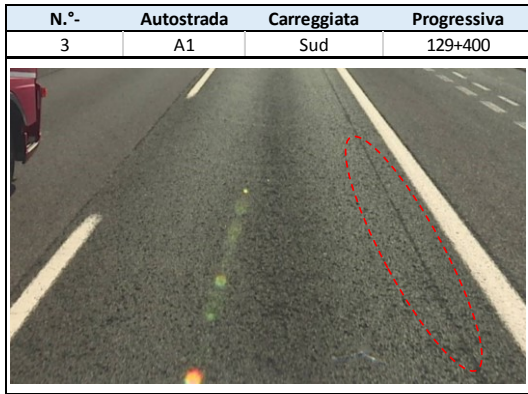


**Figura 2.9:** schema delle operazioni di carotaggio (campioni A e B in prossimità della fessurazione longitudinale, per tutto lo spessore degli strati legati; campione C in un punto di pavimentazione non ammalorata, limitatamente allo strato di usura)

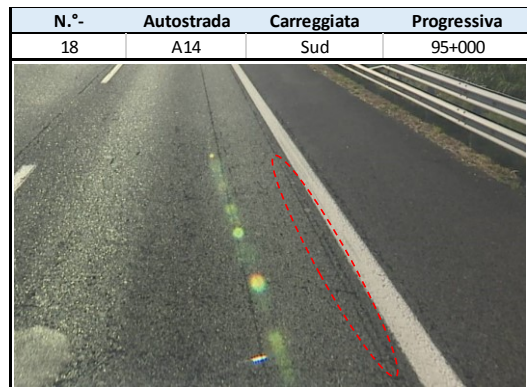
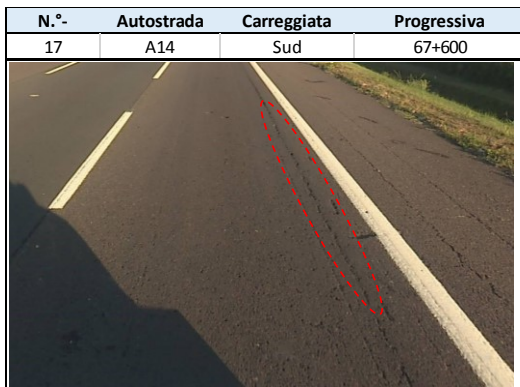
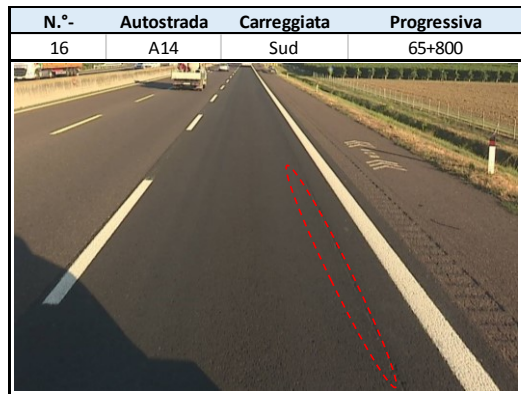
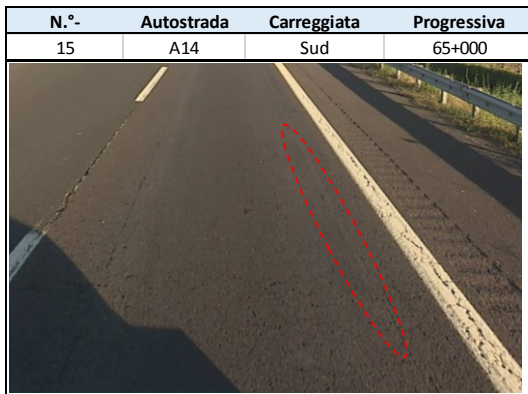
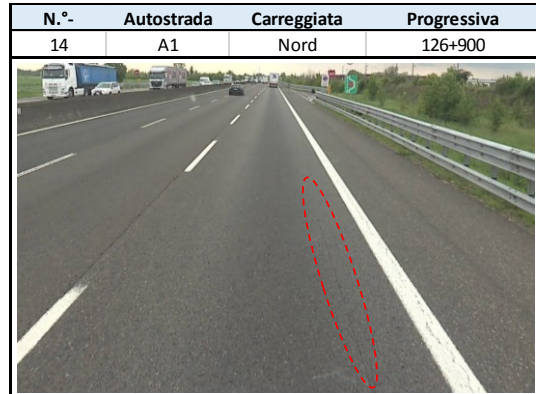
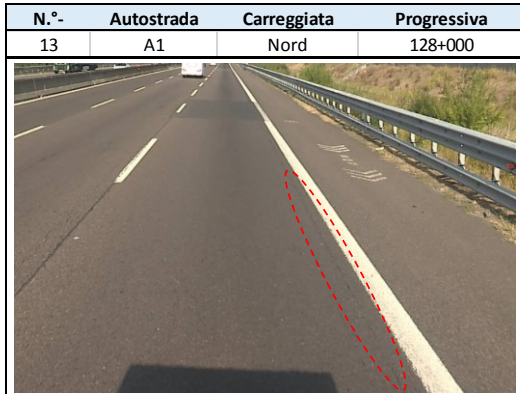
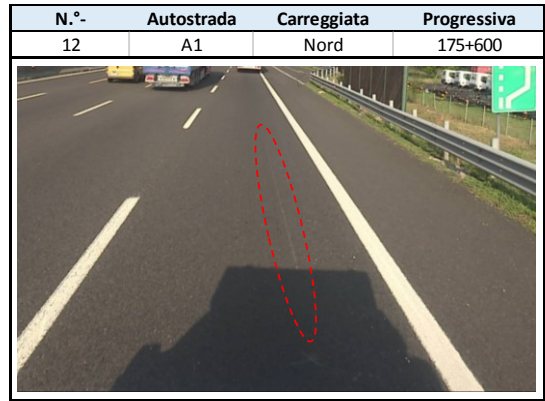
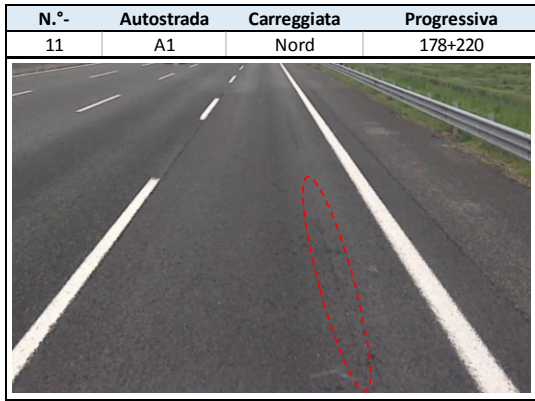
PROGRAMMA CAROTAGGI DIREZIONE 3° TRONCO - BOLOGNA					
n.	Autostrada	Carr.	progr.	NOTA	TIPOLOGIA
1	A1	Sud	128+300	incisione a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2018
2	A1	Sud	129+000	incisione a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2013
3	A1	Sud	129+400	incisione a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2017
4	A1	Sud	130+000	incisione a circa 50-100 cm da marg.dx	DRENANTE 2015
5	A1	Sud	130+900	incisione a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2016
6	A1	Sud	156+500	fessura centro corsia	DRENANTE 2011
7	A1	Sud	168+600	incisione a circa 150 cm da marg.dx	DRENANTE 2006
8	A1	Sud	179+000	incisione a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2015
9	A1	Sud	179+500	incisione a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2016
10	A1	Nord	188+600	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2014
11	A1	Nord	178+220	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2012
12	A1	Nord	175+600	incisione a circa 150 cm da marg.dx	DRENANTE 2017
13	A1	Nord	128+000	incisione a circa 10 cm da marg.dx	DRENANTE 2011
14	A1	Nord	126+900	incisione a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2010
15	A14	Sud	65+000	fess. a circa 50 cm da tratt. dx	DRENANTE 2008
16	A14	Sud	65+800	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2016
17	A14	Sud	67+600	fess. a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2009
18	A14	Sud	95+000	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2007
19	A14	Sud	96+000	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2007
20	A14	Sud	107+400	fess. a circa 20 cm da marg.dx	DRENANTE 2011
21	A14	Sud	108+000	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2010
22	A14	Sud	118+000	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2013
23	A14	Sud	125+000	fess.a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2013

Tabella 2.6: riepilogo campagna di carotaggio













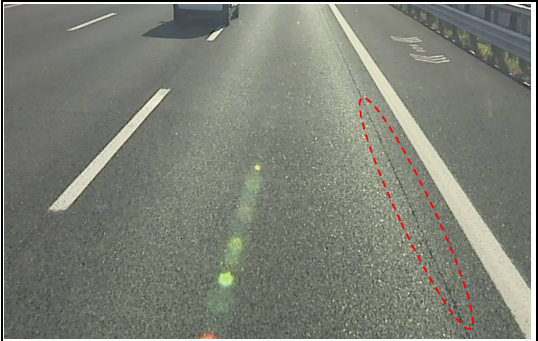
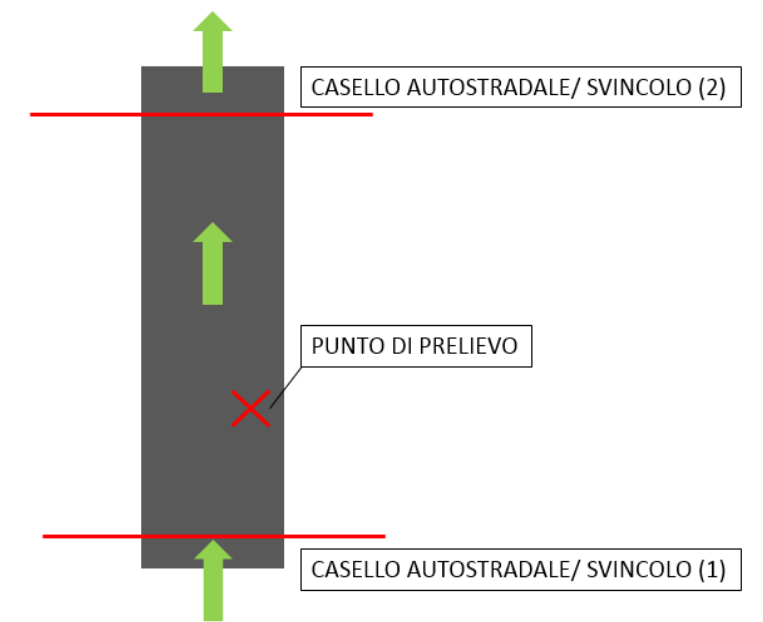
N.°	Autostrada	Carreggiata	Progressiva
19	A14	Sud	96+000
			
20	A14	Sud	107+400
			
21	A14	Sud	108+000
			
22	A14	Sud	118+000
			
23	A14	Sud	125+000
			

Tabella 2.7: punti di prelievo

### *Dati di traffico*

Al fine di comprendere l'importanza nel considerare i carichi trasmessi sulla pavimentazione per la caratterizzazione del comportamento nei riguardi del TDC e allo scopo di individuare una metodologia valida, sviluppabile in studi futuri, finalizzata all'elaborazione di una legge in grado di correlare il livello di propagazione della fessurazione da top-down (espresso tramite il valore dello spessore della cricca in profondità) con il numero di passaggi veicolari in quel determinato punto, è stato associato ad ogni punto di prelievo il numero di veicoli

transitati nell'intervallo compreso tra la stesa della pavimentazione e l'individuazione della fessura tramite i fotogrammi dell'ARAN (prima parte dell'anno 2019). I dati di traffico, forniti direttamente da Autostrade per l'Italia, si riferiscono al tratto compreso tra due caselli o svincoli autostradali consecutivi, all'interno del quale è localizzato il punto in cui è stato effettuato il prelievo del campione, divisi per categorie di pedaggio (figura 2.10). Il valore di traffico associato ad ogni punto oggetto del carotaggio è dato dalla somma dei valori annuali registrati da ASPI, dal dato più recente (anno 2019) all'anno di stesa della pavimentazione del tratto di esame (che ovviamente varia in base al punto di prelievo considerato) (tabella 2.8).



**Figura 2.10:** schematizzazione del rilevamento del traffico transitante tra due caselli autostradali (o svincoli) consecutivi

n.	Autostrada	Carr.	n. corsie	progr.	TIPOLOGIA	TRATTO	TGM per carreggiata e classe di traffico					TGM
							A	B	3	4	5	
1	A1	Sud	4	128+300	DRENANTE 2018	TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE - REGGIO EMILIA	58,912	7,226	1,616	1,345	12,040	81,139
2	A1	Sud	4	129+000	DRENANTE 2013	TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE - REGGIO EMILIA	196,557	24,611	5,244	4,274	39,030	269,715
3	A1	Sud	4	129+400	DRENANTE 2017	TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE - REGGIO EMILIA	87,844	10,804	2,389	1,990	17,839	120,867
4	A1	Sud	4	130+000	DRENANTE 2015	TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE - REGGIO EMILIA	144,141	17,856	3,829	3,197	28,775	197,798
5	A1	Sud	4	130+900	DRENANTE 2016	TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE - REGGIO EMILIA	116,254	14,347	3,127	2,608	23,418	159,753
6	A1	Sud	3	156+500	DRENANTE 2011	ALL. A1-A22 - MODENA NORD	352,106	45,571	9,607	6,884	68,485	482,653
7	A1	Sud	3	168+600	DRENANTE 2006	MODENA NORD - MODENA SUD	497,269	65,619	14,301	9,893	101,660	688,742
8	A1	Sud	3	179+000	DRENANTE 2015	MODENA SUD - VALSAMOGGIA	202,472	24,228	4,783	3,942	38,222	273,646
9	A1	Sud	3	179+500	DRENANTE 2016	MODENA SUD - VALSAMOGGIA	163,729	19,531	3,903	3,206	31,210	221,578
10	A1	Nord	3	188+600	DRENANTE 2014	ALL. A1-RAC. CASALECCHIO - ALL. A1-A14	75,514	8,985	1,633	1,537	14,952	102,620
11	A1	Nord	3	178+220	DRENANTE 2012	VALSAMOGGIA - MODENA SUD	315,532	37,980	7,397	5,717	58,791	425,416
12	A1	Nord	3	175+600	DRENANTE 2017	VALSAMOGGIA - MODENA SUD	124,163	14,749	2,971	2,424	23,881	168,189
13	A1	Nord	4	128+000	DRENANTE 2011	REGGIO EMILIA - TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE	249,739	31,977	6,777	5,293	49,094	342,879
14	A1	Nord	4	126+900	DRENANTE 2010	REGGIO EMILIA - TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE	277878	35695	7635	5879	54497	381,584
15	A14	Sud	3	65+000	DRENANTE 2008	FAENZA - FORLÌ	326,751	39,067	8,560	4,091	45,834	424,303
16	A14	Sud	3	65+800	DRENANTE 2016	FAENZA - FORLÌ	111,935	12,527	2,701	1,467	15,894	144,525
17	A14	Sud	3	67+600	DRENANTE 2009	FAENZA - FORLÌ	299,672	35,275	7,673	3,742	41,679	388,042
18	A14	Sud	3	95+000	DRENANTE 2007	CESENA NORD - CESENA	336,245	39,947	8,507	4,000	42,440	431,139
19	A14	Sud	3	96+000	DRENANTE 2007	CESENA NORD - CESENA	336245	39947	8507	4000	42440	431,139
20	A14	Sud	3	107+400	DRENANTE 2011	CESENA - VALLE DEL RUBICONE	221,976	25,895	5,468	2,767	28,482	284,589
21	A14	Sud	3	108+000	DRENANTE 2010	CESENA - VALLE DEL RUBICONE	246,604	28,935	6,151	3,056	31,771	316,516
22	A14	Sud	3	118+000	DRENANTE 2013	RIMINI NORD - RIMINI SUD	162,296	18,938	3,999	2,147	22,801	210,181
23	A14	Sud	3	125+000	DRENANTE 2013	RIMINI NORD - RIMINI SUD	162296	18938	3999	2147	22801	210181

**Tabella 2.8:** passaggi veicolari per ogni punto di prelievo, divisi per categorie di pedaggio ed espressi come traffico giornaliero medio totale

Di seguito si riporta la tabella dei dati di traffico fornita da ASPI (tabella 2.9). Le diverse classi di pedaggio sono suddivise nel modo seguente:

- Classe A: veicoli a 2 assi con altezza in corrispondenza del 1° asse < 1,30 m;
- Classe B: veicoli a 2 assi con altezza in corrispondenza del 1° asse > 1,30 m;
- Classe 3: veicoli a 3 assi;
- Classe 4: veicoli a 4 assi;
- Classe 5: veicoli a 5 o più assi.

				TGM per carreggiata e classe di traffico					
Autostrada	Carr.	TRATTO	ANNO	A	B	3	4	5	
A1	Sud	TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE- REGGIO EMILIA	2013	25.848	3.362	715	523	5.047	*
A1	Sud	TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE- REGGIO EMILIA	2014	26.568	3.393	699	554	5.208	*
A1	Sud	TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE- REGGIO EMILIA	2015	27.887	3.508	703	590	5.357	*
A1	Sud	TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE- REGGIO EMILIA	2016	28.410	3.543	738	617	5.578	***
A1	Sud	TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE- REGGIO EMILIA	2017	28.933	3.578	773	645	5.799	***
A1	Sud	TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE- REGGIO EMILIA	2018	29.456	3.613	808	673	6.020	**
A1	Sud	TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE- REGGIO EMILIA	2019	29.456	3.613	808	673	6.020	****
A1	Sud	ALL A1-A22 - MODENA NORD	2011	39.606	5.450	1.201	725	7.721	*
A1	Sud	ALL A1-A22 - MODENA NORD	2012	37.253	5.067	1.090	673	7.148	*
A1	Sud	ALL A1-A22 - MODENA NORD	2013	36.892	4.894	1.032	672	7.006	*
A1	Sud	ALL A1-A22 - MODENA NORD	2014	37.666	4.924	1.005	717	7.179	*
A1	Sud	ALL A1-A22 - MODENA NORD	2015	38.940	5.028	1.067	765	7.399	*
A1	Sud	ALL A1-A22 - MODENA NORD	2016	39.606	5.038	1.033	795	7.670	***
A1	Sud	ALL A1-A22 - MODENA NORD	2017	40.271	5.049	1.061	825	7.940	***
A1	Sud	ALL A1-A22 - MODENA NORD	2018	40.936	5.060	1.089	855	8.211	**
A1	Sud	ALL A1-A22 - MODENA NORD	2019	40.936	5.060	1.089	855	8.211	****
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2006	34.333	5.226	1.237	677	7.481	*
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2007	35.426	5.388	1.230	737	7.756	*
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2008	35.753	5.176	1.207	734	7.737	*
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2009	36.096	4.607	1.106	660	7.019	*
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2010	36.340	4.655	1.102	666	7.355	*
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2011	35.939	4.807	1.045	671	7.238	*
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2012	33.644	4.441	945	622	6.659	*
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2013	33.248	4.298	891	624	6.538	*
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2014	33.924	4.327	863	664	6.664	*
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2015	35.099	4.427	869	715	6.873	*
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2016	35.885	4.489	906	744	7.189	***
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2017	36.670	4.551	943	774	7.506	***
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2018	37.455	4.613	979	803	7.823	**
A1	Sud	MODENA NORD - MODENA SUD	2019	37.455	4.613	979	803	7.823	****
A1	Sud	MODENA SUD - VALSAMOGGIA	2015	38.743	4.697	880	736	7.012	*
A1	Sud	MODENA SUD - VALSAMOGGIA	2016	39.716	4.780	923	765	7.363	***
A1	Sud	MODENA SUD - VALSAMOGGIA	2017	40.689	4.862	965	794	7.715	***
A1	Sud	MODENA SUD - VALSAMOGGIA	2018	41.662	4.945	1.008	823	8.066	**
A1	Sud	MODENA SUD - VALSAMOGGIA	2019	41.662	4.945	1.008	823	8.066	****
A1	Nord	ALL A1-RAC. CASALEC. - ALL A1-A14	2014	11.742	1.430	257	221	2.265	*
A1	Nord	ALL A1-RAC. CASALEC. - ALL A1-A14	2015	12.203	1.465	253	246	2.327	*
A1	Nord	ALL A1-RAC. CASALEC. - ALL A1-A14	2016	12.509	1.491	265	255	2.444	*****
A1	Nord	ALL A1-RAC. CASALEC. - ALL A1-A14	2017	12.816	1.516	278	265	2.561	*****
A1	Nord	ALL A1-RAC. CASALEC. - ALL A1-A14	2018	13.122	1.542	290	275	2.677	*****
A1	Nord	ALL A1-RAC. CASALEC. - ALL A1-A14	2019	13.122	1.542	290	275	2.677	*****
A1	Nord	VALSAMOGGIA - MODENA SUD	2012	37.349	4.683	938	625	6.798	*
A1	Nord	VALSAMOGGIA - MODENA SUD	2013	37.012	4.531	878	607	6.702	*
A1	Nord	VALSAMOGGIA - MODENA SUD	2014	37.796	4.551	855	642	6.862	*
A1	Nord	VALSAMOGGIA - MODENA SUD	2015	39.195	4.690	852	687	7.115	*
A1	Nord	VALSAMOGGIA - MODENA SUD	2016	40.017	4.775	904	732	7.432	***
A1	Nord	VALSAMOGGIA - MODENA SUD	2017	40.840	4.860	956	778	7.749	***
A1	Nord	VALSAMOGGIA - MODENA SUD	2018	41.662	4.945	1.008	823	8.066	**
A1	Nord	VALSAMOGGIA - MODENA SUD	2019	41.662	4.945	1.008	823	8.066	****
A1	Nord	REGGIO EMILIA - TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE	2010	28.139	3.718	859	586	5.403	*
A1	Nord	REGGIO EMILIA - TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE	2011	27.873	3.793	825	570	5.372	*
A1	Nord	REGGIO EMILIA - TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE	2012	26.055	3.488	757	522	5.042	*
A1	Nord	REGGIO EMILIA - TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE	2013	25.656	3.374	708	507	4.967	*
A1	Nord	REGGIO EMILIA - TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE	2014	26.341	3.396	690	535	5.123	*
A1	Nord	REGGIO EMILIA - TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE	2015	27.723	3.544	686	570	5.265	*
A1	Nord	REGGIO EMILIA - TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE	2016	28.301	3.567	727	604	5.517	***
A1	Nord	REGGIO EMILIA - TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE	2017	28.878	3.590	767	639	5.768	***
A1	Nord	REGGIO EMILIA - TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE	2018	29.456	3.613	808	673	6.020	**
A1	Nord	REGGIO EMILIA - TERRE DI CANOSSA CAMPEGINE	2019	29.456	3.613	808	673	6.020	****

Autostrada	Carr.	TRATTO	ANNO	TGM per carreggiata e classe di traffico					
				A	B	3	4	5	
A14	Sud	FAENZA - FORLÌ	2008	27.079	3.792	887	349	4.155	*
A14	Sud	FAENZA - FORLÌ	2009	27.635	3.413	810	321	3.812	*
A14	Sud	FAENZA - FORLÌ	2010	27.856	3.389	799	331	3.972	*
A14	Sud	FAENZA - FORLÌ	2011	27.686	3.480	761	331	3.861	*
A14	Sud	FAENZA - FORLÌ	2012	25.674	3.173	684	313	3.564	*
A14	Sud	FAENZA - FORLÌ	2013	25.513	3.074	653	314	3.461	*
A14	Sud	FAENZA - FORLÌ	2014	26.193	3.075	634	324	3.480	*
A14	Sud	FAENZA - FORLÌ	2015	27.181	3.145	632	339	3.635	*
A14	Sud	FAENZA - FORLÌ	2016	27.538	3.139	651	352	3.786	***
A14	Sud	FAENZA - FORLÌ	2017	27.895	3.133	670	364	3.936	***
A14	Sud	FAENZA - FORLÌ	2018	28.251	3.128	690	376	4.086	**
A14	Sud	FAENZA - FORLÌ	2019	28.251	3.128	690	376	4.086	****
A14	Sud	CESENA NORD - CESENA	2007	26.338	3.731	831	328	3.616	*
A14	Sud	CESENA NORD - CESENA	2008	25.773	3.513	772	314	3.503	*
A14	Sud	CESENA NORD - CESENA	2009	26.287	3.212	714	284	3.237	*
A14	Sud	CESENA NORD - CESENA	2010	26.100	3.146	694	292	3.339	*
A14	Sud	CESENA NORD - CESENA	2011	25.737	3.138	661	287	3.226	*
A14	Sud	CESENA NORD - CESENA	2012	23.727	2.846	593	273	2.941	*
A14	Sud	CESENA NORD - CESENA	2013	23.962	2.817	581	280	2.874	*
A14	Sud	CESENA NORD - CESENA	2014	24.810	2.836	574	286	2.903	*
A14	Sud	CESENA NORD - CESENA	2015	25.822	2.919	572	302	3.086	*
A14	Sud	CESENA NORD - CESENA	2016	26.311	2.931	597	318	3.238	***
A14	Sud	CESENA NORD - CESENA	2017	26.800	2.944	622	334	3.391	***
A14	Sud	CESENA NORD - CESENA	2018	27.289	2.957	647	351	3.543	**
A14	Sud	CESENA NORD - CESENA	2019	27.289	2.957	647	351	3.543	****
A14	Sud	CESENA - VALLE DEL RUBICONE	2010	24.629	3.040	682	288	3.288	*
A14	Sud	CESENA - VALLE DEL RUBICONE	2011	24.207	3.024	651	283	3.183	*
A14	Sud	CESENA - VALLE DEL RUBICONE	2012	22.313	2.746	590	269	2.905	*
A14	Sud	CESENA - VALLE DEL RUBICONE	2013	22.925	2.765	581	276	2.849	*
A14	Sud	CESENA - VALLE DEL RUBICONE	2014	23.690	2.785	574	285	2.881	*
A14	Sud	CESENA - VALLE DEL RUBICONE	2015	24.794	2.885	573	302	3.060	*
A14	Sud	CESENA - VALLE DEL RUBICONE	2016	25.335	2.902	596	318	3.212	***
A14	Sud	CESENA - VALLE DEL RUBICONE	2017	25.876	2.918	619	334	3.363	***
A14	Sud	CESENA - VALLE DEL RUBICONE	2018	26.418	2.935	642	350	3.515	**
A14	Sud	CESENA - VALLE DEL RUBICONE	2019	26.418	2.935	642	350	3.515	****
A14	Sud	RIMINI NORD - RIMINI SUD	2013	21.090	2.589	559	269	2.923	*
A14	Sud	RIMINI NORD - RIMINI SUD	2014	22.014	2.636	548	285	2.955	*
A14	Sud	RIMINI NORD - RIMINI SUD	2015	22.939	2.703	544	292	3.127	*
A14	Sud	RIMINI NORD - RIMINI SUD	2016	23.439	2.725	563	307	3.270	***
A14	Sud	RIMINI NORD - RIMINI SUD	2017	23.938	2.747	582	321	3.413	***
A14	Sud	RIMINI NORD - RIMINI SUD	2018	24.438	2.769	601	336	3.557	**
A14	Sud	RIMINI NORD - RIMINI SUD	2019	24.438	2.769	601	336	3.557	****

Tabella 2.9: dati di traffico forniti da ASPI, divisi per categorie di pedaggio

I dati di traffico utili per l'analisi sono stati ottenuti in modi differenti:

\* fino al 2015 compreso, i dati disponibili per ogni classe di traffico del numero dei passaggi per tratto elementare e carreggiata sono stati divisi per 365 per ottenere il dato di TGM per carreggiata;

\*\* per il 2018, i dati disponibili per ogni classe di traffico del TGM bidirezionale per tratto elementare sono stati divisi per 2 per ottenere il dato di TGM per carreggiata;

\*\*\* per il 2016 ed il 2017, i valori TGM per carreggiata sono stati ottenuti interpolando linearmente i dati fra 2015 e 2018;

\*\*\*\* per il 2019, i valori TGM per carreggiata sono stati ipotizzati pari a quelli del 2018;

\*\*\*\*\* nel caso in cui non erano disponibili i dati di TGM per il 2018, sono stati ricavati i dati del TGM per carreggiata per ogni classe di traffico e per gli anni 2016, 2017 e 2018, partendo dal TGM per carreggiata dell'anno 2015 secondo lo stesso tasso di crescita registrato nel tratto elementare contiguo negli stessi anni.

Dato il numero di passaggi associati ad ogni punto di prelievo, nell'intervallo compreso tra l'anno di stesa della pavimentazione (diverso in base al campione) e l'anno a cui si riferiscono i fotogrammi dell'ARAN utilizzati per il rilievo visivo, è necessario applicare a tale dato uno spettro di traffico valido. Infatti, gli spettri relativi al traffico pesante autostradale disponibili per il territorio italiano, e normalmente utilizzati, risultano datati (spettri di traffico riportati nel Catalogo delle Pavimentazioni Stradali proposto dal CNR [34]) e non più rispondenti alla realtà a causa dell'avvento della logistica nel settore dei trasporti che tende a privilegiare il trasporto in autostrada con veicoli prevalentemente a 5 o più assi (autotreni e autoarticolati)) (figura 2.11, figura 2.12). Come si è sottolineato nel capitolo relativo allo stato dell'arte relativo al top-down cracking, la fessurazione di tipo top-down è causata principalmente dal regime di tensioni originatisi all'interfaccia pneumatico-pavimentazione, che raggiungono entità determinanti per l'innescio e la propagazione della cricca soprattutto nel caso di pneumatici singoli maggiorati: in tal senso, sottostimare il numero di passaggi di mezzi pesanti (in particolare a 5 o più assi, i principali veicoli che appunto utilizzano pneumatici super single) equivarrebbe a commettere una valutazione largamente errata sui carichi trasmessi alla pavimentazione. In tale sede di studio, si utilizzeranno gli spettri di traffico (figura 2.13, figura 2.14, figura 2.15) elaborati per mezzo di un rilievo diretto (mediante visione telecamere di traffico), oggetto di un'altra tesi di laurea recente (gennaio 2020), sviluppata nel medesimo ambito di ricerca finalizzata all'aggiornamento del PMS autostradale.

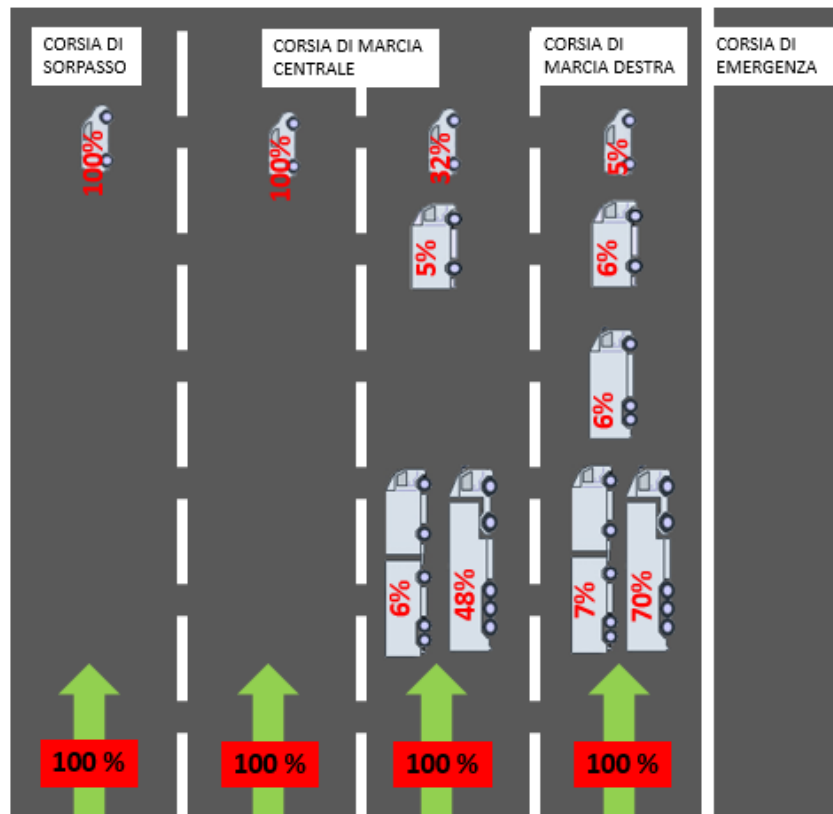
Tipo di veicolo	N° Assi	Distribuzione dei carichi per asse in KN			
1) autocarri leggeri	2	↓10	↓20		
2) " "	"	↓15	↓30		
3) autocarri medi e pesanti	"	↓40	↓80		
4) " " "	"	↓50	↓110		
5) autocarri pesanti	3	↓40	↓80	↓80	
6) " " "	"	↓60	↓100	↓100	
7) autotreni e autoarticolati	4	↓40	↓90	↓80	↓80
8) " " "	"	↓60	↓100	↓100	↓100
9) " " "	5	↓40	↓80	↓80	↓80
10) " " "	"	↓60	↓90	↓90	↓100
11) " " "	"	↓40	↓100	↓80	↓80
12) " " "	"	↓60	↓110	↓90	↓90
13) mezzi d'opera	"	↓50	↓120	↓130	↓130
14) autobus	2	↓40	↓80		
15) " "	2	↓60	↓100		
16) " "	2	↓50	↓80		

Figura 2.11: tipologie di veicoli e carichi divisi per asse, considerati dal Catalogo delle Pavimentazioni del CNR

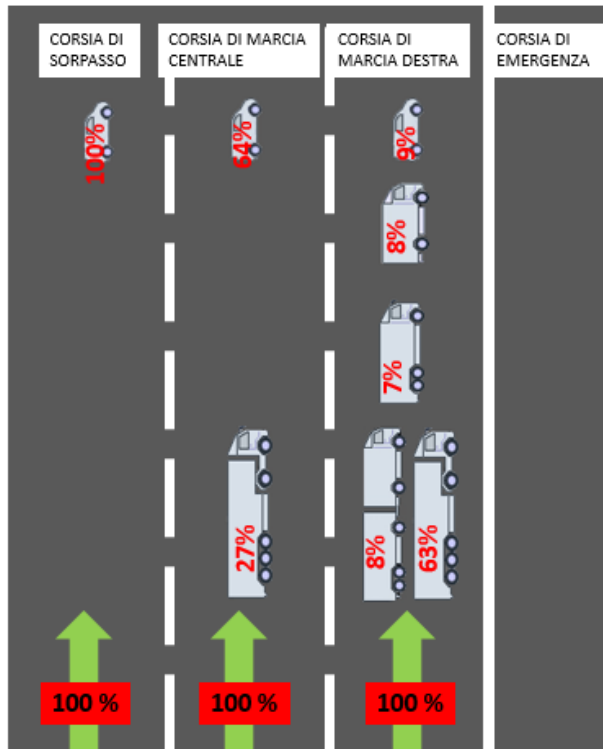
Tipo di strada	Tipo di veicolo															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1) autostrade extraurbane	12.2	----	24.4	14.6	2.4	12.2	2.4	4.9	2.4	4.9	2.4	4.9	0.10	----	----	12.2
2) " urbane	18.2	18.2	16.5	----	----	----	----	----	----	----	----	----	1.6	18.2	27.3	----
3) strade extr. principali e secondarie a forte traffico	----	13.1	39.5	10.5	7.9	2.6	2.6	2.5	2.6	2.5	2.6	2.6	0.5	----	----	10.5
4) strade extraurb. second. ordin.	----	----	58.8	29.4	----	5.9	----	2.8	----	----	----	----	0.2	----	----	2.9
5) " extr. second. -turistiche	24.5	----	40.8	16.3	----	4.15	----	2	----	----	----	----	0.05	----	----	12.2
6) " urbane di scorrimento	18.2	18.2	16.5	----	----	----	----	----	----	----	----	----	1.6	18.2	27.3	----
7) " " di quartiere e locali	80	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	20	----	----
8) corsie preferenziali	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	47	53	----

Figura 2.12: spettro del CNR, dipendente dalla tipologia di strada

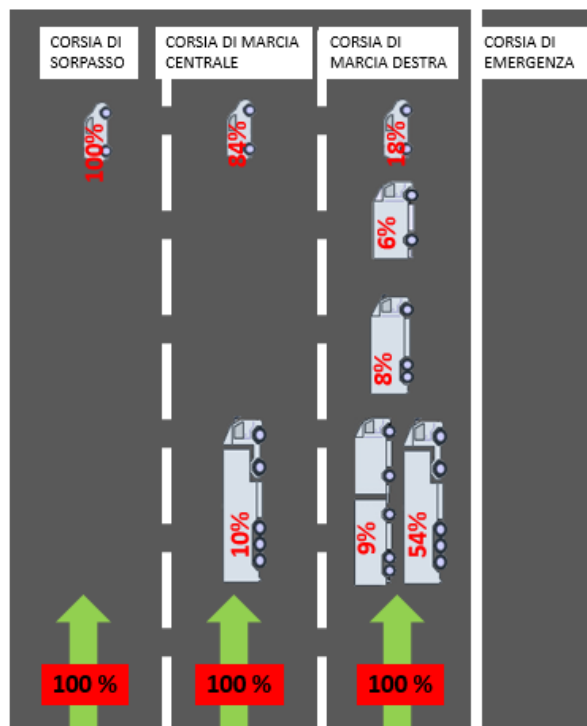




**Figura 2.13:** schematizzazione semplificata dello spettro di traffico dei veicoli commerciali utilizzato per il segmento autostradale A1 MILANO-NAPOLI (Ponte Fiume Enza- All.A14), carreggiata a 4 corsie (nel disegno esplicativo vengono riportate solo le tipologie di veicolo presenti con una percentuale maggiore o uguale al 5%)



**Figura 2.14:** schematizzazione semplificata dello spettro di traffico dei veicoli commerciali utilizzato per il segmento autostradale A1 MILANO-NAPOLI (Ponte Fiume Enza- All.A14), carreggiata a 3 corsie (nel disegno esplicativo vengono riportate solo le tipologie di veicolo presenti con una percentuale maggiore o uguale al 5%)



**Figura 2.15:** schematizzazione semplificata dello spettro di traffico dei veicoli commerciali utilizzato per il segmento autostradale A14 BOLOGNA-TARANTO (All. Diramazione Ravenna- Cattolica), carreggiata a 3 corsie (nel disegno esplicativo vengono riportate solo le tipologie di veicolo presenti con una percentuale maggiore o uguale al 5%)

## 2.2 Analisi sperimentale in laboratorio

Nella seconda fase dello studio descritto, si è proceduto ad un'analisi sperimentale tramite procedure di laboratorio sui provini prelevati in sito secondo le indicazioni fornite nel paragrafo precedente (tramite un rilievo visivo di una porzione di rete, considerata rete-pilota dell'indagine, sono stati selezionati diversi punti caratterizzati da fessurazione superficiale in prossimità dei quali effettuare un carotaggio). Per ogni punto di campionamento individuato, sono state prelevate tre carote (due relative a tutti gli strati legati in corrispondenza della fessurazione superficiale verosimilmente sulla striscia di impronta dello pneumatico, una carota in una porzione di pavimentazione non ammalorata, relativa al solo strato di usura drenante).

Lo studio sperimentale, eseguito in laboratorio, e descritto nel seguito, rientra in una valutazione preliminare per l'individuazione di procedure di sperimentazione, utili a caratterizzare il comportamento del conglomerato nei riguardi della fessurazione da top-down. Trovare metodi di analisi sperimentale validi per lo studio del top-down cracking, inoltre, si traduce in pratica nel distinguere i vari fattori determinanti per lo sviluppo della fessurazione superficiale e necessari da considerare per un corretto approccio al problema. Dopo una fase preliminare (figura 2.16) in cui si è proceduto allo stoccaggio e al taglio delle carote arrivate in laboratorio (fino ad un'altezza utile per facilitare le procedure di ispezione visiva, comunque superiore a qualsiasi cricca presente, propagata in profondità), si è avviato il programma di analisi sperimentale, schematizzabile in quattro punti (figura 2.17):

- ispezione visiva dei provini fessurati (due carote per ogni punto di prelievo);
- determinazione della percentuale di vuoti contenuta nei campioni di usura drenante non ammalorati;
- determinazione della rigidità del conglomerato tramite prova di modulo con apparecchiatura NAT (il test è stato eseguito sui provini di drenante non ammalorato, prelevati verosimilmente a centro corsia);
- determinazione della resistenza a trazione del conglomerato tramite prova di rottura a trazione indiretta (prova eseguita sui provini non ammalorati).

Di seguito viene riportato, in forma tabulare, un riepilogo dei provini analizzati (tabella 2.10, tabella 2.11).

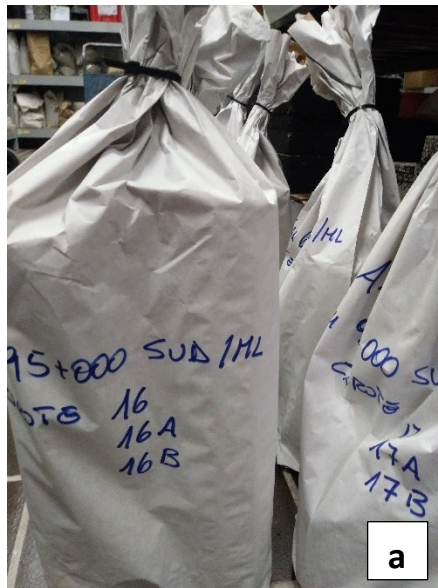


Figura 2.16: operazioni preliminari dell'analisi sperimentale: carote arrivate in laboratorio (a); taglio dei provini (b)

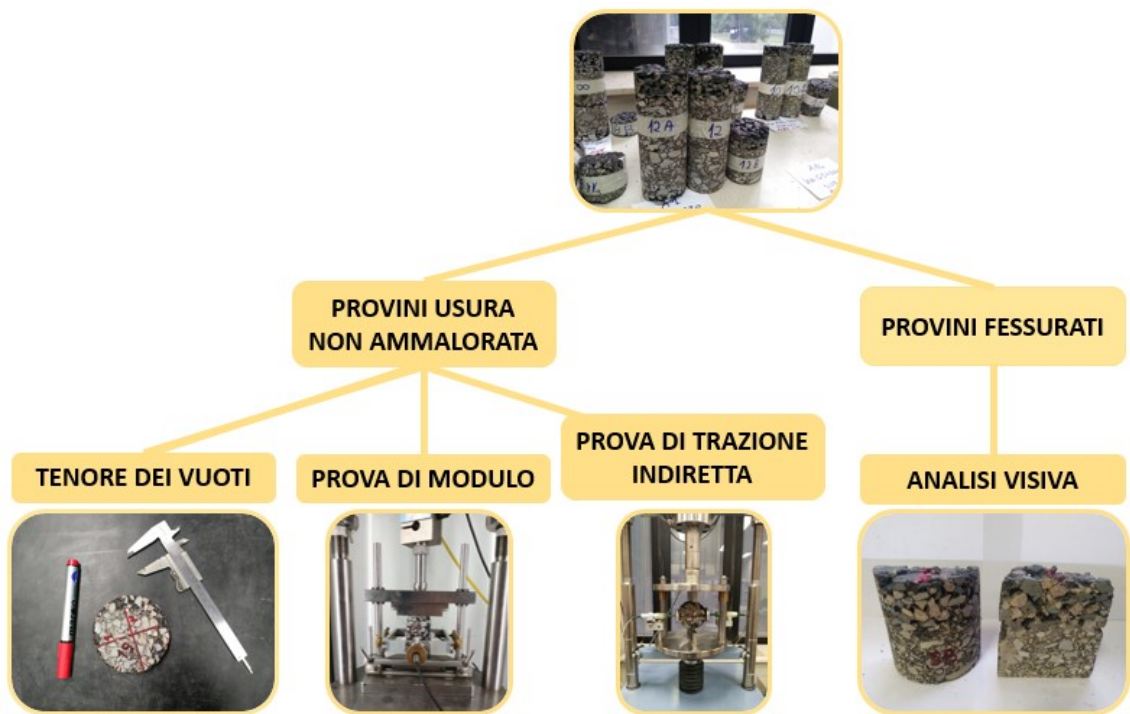


Figura 2.17: schematizzazione sintetica del programma sperimentale eseguito in laboratorio

RIEPILOGO PROVINI FESSURATI						
provino 1	provino 2	Autostrada	Carr.	progr.	NOTA	TIPOLOGIA
1	1A	A1	Nord	126+900	incisione a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2010
2	2A	A1	Sud	128+300	incisione a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2018
3	3A	A1	Sud	129+000	incisione a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2013
4	4A	A1	Sud	129+400	incisione a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2017
5	5A	A1	Sud	130+000	incisione a circa 50-100 cm da marg.dx	DRENANTE 2015
6	6A	A1	Sud	130+900	incisione a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2016
7	7A	A1	Sud	156+500	fessura centro corsia	DRENANTE 2011
8	8A	A1	Sud	168+600	incisione a circa 150 cm da marg.dx	DRENANTE 2006
9	9A	A1	Sud	179+000	incisione a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2015
10	10A	A1	Sud	179+500	incisione a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2016
11	11A	A1	Nord	188+600	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2014
12	12A	A1	Nord	178+220	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2012
13	13A	A14	Sud	65+000	fess. a circa 50 cm da tratt. dx	DRENANTE 2008
14	14A	A14	Sud	65+800	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2016
15	15A	A14	Sud	67+600	fess. a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2009
16	16A	A14	Sud	95+000	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2007
17	17A	A14	Sud	96+000	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2007
18	18A	A14	Sud	107+400	fess. a circa 20 cm da marg.dx	DRENANTE 2011
19	19A	A14	Sud	108+000	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2010
20	20A	A14	Sud	118+000	fess. a circa 100 cm da marg.dx	DRENANTE 2013
21	21A	A14	Sud	125+000	fess.a circa 50 cm da marg.dx	DRENANTE 2013
(*)	(*)	A1	Nord	175+600	incisione a circa 150 cm da marg.dx	DRENANTE 2017
(*)	(*)	A1	Nord	128+000	incisione a circa 10 cm da marg.dx	DRENANTE 2011

\*carotaggio in fase di programmazione

Tabella 2.10: riepilogo provini zona fessurata

RIEPILOGO PROVINI STRATO DI USURA				
provino	Autostrada	Carr.	progr.	TIPOLOGIA
1B	A1	Nord	126+900	DRENANTE 2010
2B	A1	Sud	128+300	DRENANTE 2018
3B	A1	Sud	129+000	DRENANTE 2013
4B	A1	Sud	129+400	DRENANTE 2017
5B	A1	Sud	130+000	DRENANTE 2015
6B (*)	A1	Sud	130+900	DRENANTE 2016
7B	A1	Sud	156+500	DRENANTE 2011
8B	A1	Sud	168+600	DRENANTE 2006
9B	A1	Sud	179+000	DRENANTE 2015
10B	A1	Sud	179+500	DRENANTE 2016
11B	A1	Nord	188+600	DRENANTE 2014
12B	A1	Nord	178+220	DRENANTE 2012
13B	A14	Sud	65+000	DRENANTE 2008
14B	A14	Sud	65+800	DRENANTE 2016
15B	A14	Sud	67+600	DRENANTE 2009
16B (**)	A14	Sud	95+000	DRENANTE 2007
17B	A14	Sud	96+000	DRENANTE 2007
18B	A14	Sud	107+400	DRENANTE 2011
19B	A14	Sud	108+000	DRENANTE 2010
20B	A14	Sud	118+000	DRENANTE 2013
21B	A14	Sud	125+000	DRENANTE 2013
(***)	A1	Nord	175+600	DRENANTE 2017
(***)	A1	Nord	128+000	DRENANTE 2011

\* provino non prelevato ( solo campioni relativi alla zona fessurata)  
 \*\* provino danneggiato in fase di carotaggio  
 \*\*\* carotaggio in fase di programmazione

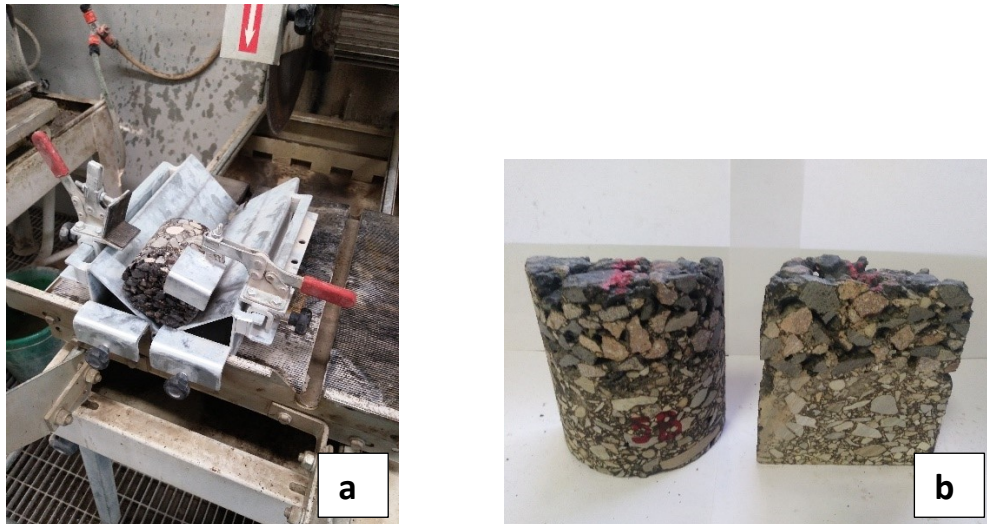
Tabella 2.11: riepilogo provini relativi allo strato di usura non ammalorato

### *Analisi dei provini fessurati*

La serie di provini prelevati in sito nella zona soggetta a fessurazione (in prossimità della striscia di impronta dello pneumatico) è stata esaminata visivamente per individuare e caratterizzare eventuali fessure superficiali. In una prima fase si è proceduto all'osservazione della carota intera, sia esaminandola di profilo (per trovare una possibile cricca propagatosi in profondità), sia dall'alto (per osservare da vicino la fessurazione sulla superficie individuata in sito). A tal proposito è stato utile anche l'utilizzo di una lama per facilitare l'individuazione di eventuali punti di innesco della fessurazione sulla superficie (figura 2.18). In una seconda fase, inoltre, si è effettuato un taglio dei provini nella direzione diametrale perpendicolare a quella della fessura, per permettere un'osservazione complementare della sezione interna del provino (eventuali fessure difficilmente visibili per il normale sgranamento derivante dalle operazioni di carotaggio, in questo modo risultano più chiare nel loro sviluppo) (figura 2.19).



**Figura 2.18:** utilizzo di una lama per l'individuazione di un'eventuale cricca sulla superficie del provino



**Figura 2.19:** operazioni di taglio lungo il diametro perpendicolare alla direzione della fessura del provino (a); campione nelle fasi successive al taglio (b)

#### *Tenore dei vuoti della miscela*

La percentuale dei vuoti all'interno della miscela è un fattore fondamentale per la caratterizzazione del comportamento nei riguardi del TDC del conglomerato bituminoso in esame. Un alto tenore dei vuoti infatti favorisce un decremento prestazionale del conglomerato nei riguardi della resistenza a fessurazione superficiale, per due motivi fondamentali:

- all'aumentare dei vuoti, diminuisce la resistenza a fessurazione della miscela (ci sono infatti punti deboli che favoriscono l'innescò della cricca);
- all'aumentare dei vuoti, il processo di invecchiamento del conglomerato (aging) diviene più severo (l'ossidazione del provino è più spinta), causando un infragilimento e una diminuzione nella capacità di auto-riparazione della miscela.

Nell'ambito del programma sperimentale descritto, si è proceduto alla determinazione della percentuale dei vuoti dei provini relativi alla porzione dello strato di usura non ammalorato. In luogo di ricorrere a procedure di laboratorio complesse (quali l'estrazione di bitume), e non avendo la necessità di dati caratterizzati da un'alta accuratezza, il valore dei vuoti presenti in ogni provino prelevato in sito è stato calcolato attraverso il valore di massa volumica della miscela esaminata. La massa unitaria del provino è stata calcolata tramite

metodo geometrico: si sono determinate le dimensioni del provino in esame (altezza e diametro medio) per determinare tramite la formula analitica del volume del cilindro il valore del volume del campione; il rapporto tra la massa (ottenuta pesando il provino con una bilancia elettronica) e il proprio volume restituisce il valore di massa volumica.

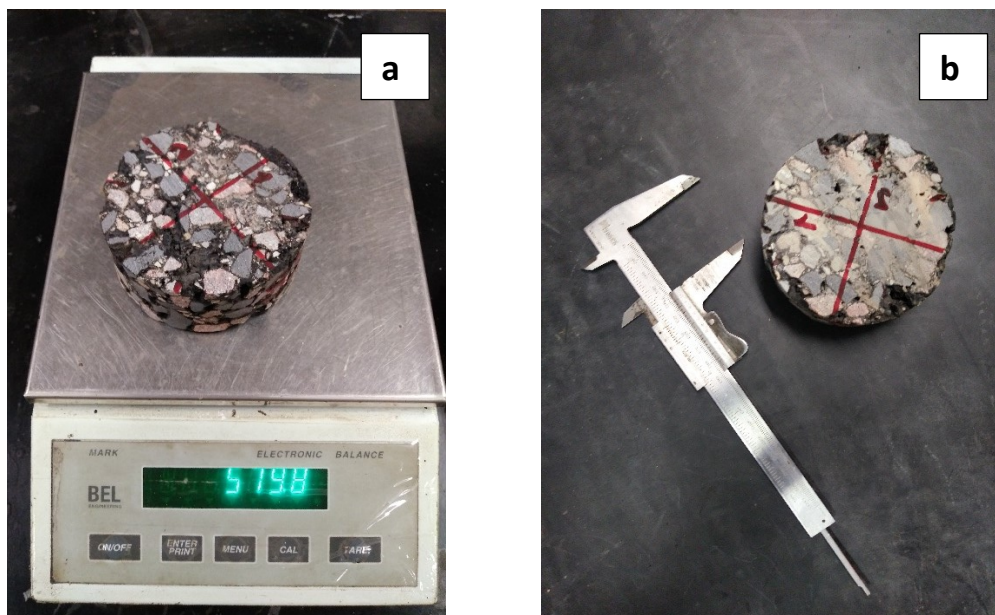
$$\gamma = \frac{m}{V}$$

dove:

- $\gamma$  rappresenta la massa volumica del provino in esame;
- $m$  è la massa del campione, determinata mediante bilancia elettronica (sensibilità 0.1 g) (figura 2.20-a);
- $V$  è il volume del provino, configurato schematicamente di forma perfettamente cilindrica (figura 2.20-b):

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^2 \cdot h$$

- $D$  è il diametro medio del provino (tabella 2.12);
- $h$  è l'altezza media del provino (tabella 2.12).



**Figura 2.20:** operazioni di misurazione per la determinazione della massa volumica tramite metodo geometrico: pesatura del provino (a); misurazione grandezze di diametro e altezza (media di 4 valori), mediante utilizzo di un calibro (sensibilità 0.05 mm) (b)



PROVINO	DIAMETRO [mm]					SPESSORE [mm]				
	D1	D2	D3	D4	Dmedio	h1	h2	h3	h4	hmedio
1B	94.15	93.90	94.00	93.85	93.98	23.00	22.35	23.10	23.35	22.95
2B	94.00	94.20	94.05	93.85	94.03	33.35	33.50	35.00	33.80	33.91
3B	94.85	93.90	93.90	93.00	93.91	21.65	22.70	22.00	23.35	22.43
4B	94.00	94.40	94.20	94.75	94.34	41.05	41.80	41.00	41.20	41.26
5B	94.20	94.10	94.30	94.20	94.20	39.50	39.90	38.75	39.20	39.34
6B (*)										
7B	141	143	142	142	142	42.80	43.00	43.30	43.20	43.08
8B	94.80	95.30	95.00	95.00	95.03	51.50	51.20	52.20	52.00	51.73
9B	94.90	94.75	94.85	94.95	94.86	52.70	52.90	52.50	52.20	52.58
10B	97.30	94.80	95.20	95.00	95.58	44.60	43.10	41.40	43.20	43.08
11B	95.00	94.80	95.00	95.00	94.95	45.00	45.20	45.40	45.50	45.28
12B	95.00	94.60	94.60	94.50	94.68	34.00	34.00	34.20	34.40	34.15
13B	94.50	95.00	95.00	95.00	94.88	41.50	41.35	41.35	41.20	41.35
14B	95.40	95.00	95.20	94.80	95.10	43.30	44.00	43.30	43.45	43.51
15B	94.70	95.00	95.00	95.10	94.95	40.20	40.75	39.50	40.50	40.24
16B (**)										
17B	95.00	95.00	94.60	95.00	94.90	40.30	40.80	41.10	42.50	41.18
18B	95.30	95.25	95.10	95.00	95.16	37.30	37.00	34.60	35.40	36.08
19B	95.20	95.20	95.00	95.30	95.18	39.75	38.30	37.50	38.95	38.63
20B	95.20	95.50	95.50	95.45	95.41	50.70	50.80	51.50	51.50	51.13
21B	94.70	94.90	94.80	94.20	94.65	63.00	64.50	64.50	62.50	63.63

\* provino non prelevato ( solo campioni relativi alla zona fessurata)  
\*\* provino danneggiato in fase di carotaggio

Tabella 2.12: misure di diametro e altezza dei provini esaminati

In maniera semplificata, considerando il quantitativo di bitume nella miscela fisso al 5% (valore usuale) e il peso specifico di un conglomerato chiuso standard pari a  $2.4 \text{ g/cm}^3$ , si è determinato il quantitativo di vuoti attraverso una proporzione tra la massa volumica calcolata e il valore del peso specifico standard di una miscela chiusa:

$$v = 100 \cdot \left( \frac{\gamma_0 - \gamma_c}{\gamma_0} \right)$$

dove:

- $v$  rappresenta il tenore di vuoti (espresso in percentuale);
- $\gamma_0$  rappresenta la massa volumica di un conglomerato chiuso standard (fissata a  $2.4 \text{ g/cm}^3$ );
- $\gamma_c$  rappresenta la massa volumica calcolata con il metodo geometrico descritto in precedenza.

### *Rigidezza del conglomerato tramite prova di modulo con apparecchiatura NAT*

Un fattore determinante per l'innescò e la propagazione del top-down cracking è costituito dal processo di invecchiamento (aging) del conglomerato che favorisce un aumento di rigidità (in modo differenziale tra la superficie e gli strati legati più profondi), un infragilimento e quindi una maggiore propensione alla fessurazione della miscela. In tal senso si è valutata la rigidità dei campioni relativi allo strato di usura integri prelevati in sito, con il fine di trovare una correlazione tra età della pavimentazione e rigidità della miscela. A tale scopo, in laboratorio, sono state eseguite prove per la determinazione del modulo di rigidità elastica del provino tramite apparecchiatura NAT.

L'apparecchiatura Nottingham Asphalt Tester (N.A.T.), ideata dall'Università di Nottingham verso la metà degli anni '70, permette di fornire un inquadramento complessivo della rigidità meccanica dei differenti conglomerati.

Volendo innanzitutto proporre una sintetica descrizione dell'apparecchiatura della macchina di prova (figura 2.21), si può dire che le componenti fondamentali del NAT sono:

- una struttura di carico;
- un'unità pneumatica;
- un sistema computerizzato di acquisizione e controllo dati;
- una cella climatica con controllo della temperatura.



Figura 2.21: apparato generale dell'apparecchiatura NAT

La struttura di prova principale si compone di una base, dell'organo di spinta e di due montanti filettati su cui, l'organo stesso, scorre verticalmente mediante una coppia di regoli. I regoli hanno la funzione di impostare l'altezza dell'apparecchiatura a seconda del tipo di prova e soprattutto del diametro del provino, avendo cura che la parte superiore del NAT rimanga perfettamente orizzontale e allineata con la base inferiore. Il modulo fondamentale dell'apparecchiatura è costituito da una trave di contrasto orizzontale e da un attuatore pneumatico, collegato ad un pistone per l'applicazione dei carichi verticali (figura 2.22). Ogni diversa caratteristica meccanica può essere valutata eventualmente con un'opportuna serie di accessori supplementari che corredano il NAT.

La trave di contrasto viene bloccata superiormente mediante un'altra coppia di regoli, per evitare spostamenti verticali dovuti al contraccolpo indotto dall'attuatore pneumatico durante l'applicazione impulsiva del carico. Al pistone è collegata una cella di carico che trasmette le misure all'unità di controllo e acquisizione dati.

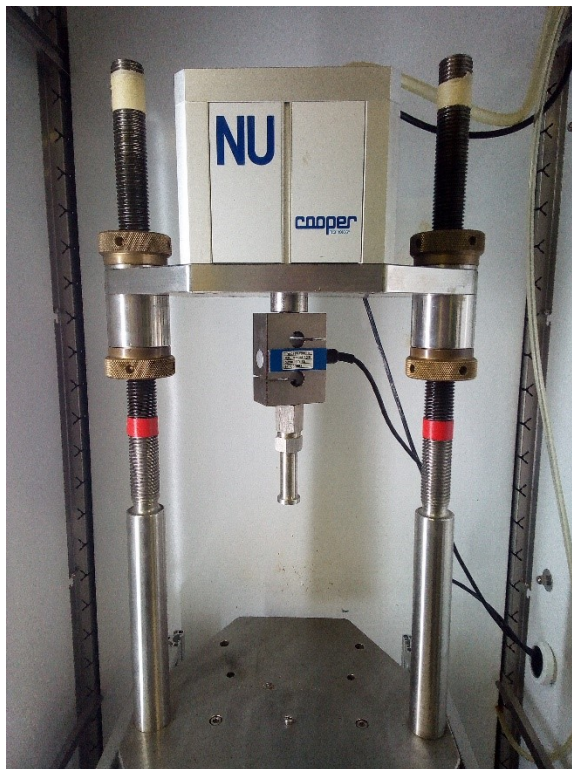


Figura 2.22: dettagli della macchina di prova

La forma dell'impulso di carico, descritta dal suo "rise-time" (durata dell'impulso), dipende dal controllo operato in continuo dalla cella di carico e dalla compressibilità dell'aria presente all'interno dell'attuatore pneumatico, il quale, tramite un pistone, consente

l'applicazione di forze verticali. I tempi di picco che vengono comunemente applicati variano da 60 a 124 ms.

Tutta la struttura del test è contenuta nella camera climatica, in cui è possibile impostare la temperatura, sia per le prove che per il condizionamento dei provini.

L'operazione di condizionamento dei provini risulta di notevole importanza, infatti, si è riscontrata l'influenza della temperatura sui risultati dei test, che di conseguenza viene mantenuta sempre costante. I campioni vengono messi a condizionare nella cella climatica per circa 4 ore prima di eseguire le prove, in questo modo è garantita la temperatura di prova anche all'interno dei provini.

In totale sono stati testati 19 provini; si tratta di campioni cilindrici di diametro 95 mm (circa, vedere tabella di riepilogo provini sottoposti all'analisi sperimentale, tabella 2.11), costituiti dalla sola porzione di strato di usura drenante, prelevato in sito in una zona non ammalorata da fessurazione superficiale (verosimilmente pavimentazione in prossimità del centro corsia).

La prova per l'ottenimento dei moduli di rigidità su provino di conglomerato (prescritta dalla norma UNI EN 12697-26 [35]) non è distruttiva e per questo molto interessante poiché permette il riutilizzo degli stessi provini per effettuare appunto un altro test, che in questo caso è costituito da una prova di rottura a trazione indiretta.

Nel dettaglio, il test consiste nell'applicazione dinamica di un carico lungo il diametro verticale del provino cilindrico e nella misurazione della deformazione lungo il piano diametrale ortogonale (figura 2.23). Il carico, di tipo non sinusoidale, è applicato mediante il dispositivo pneumatico, ed è distribuito lungo tutto lo spessore del provino attraverso due barre d'acciaio di dimensioni standard e con raggio di curvatura pari a quello del provino da testare.

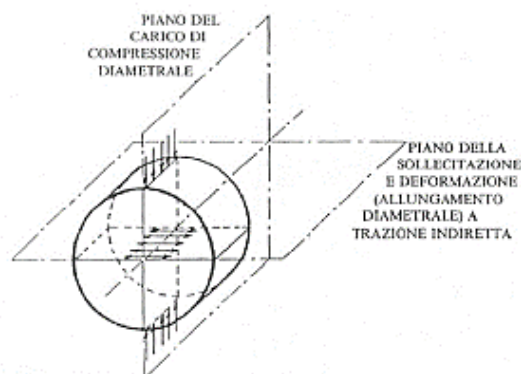


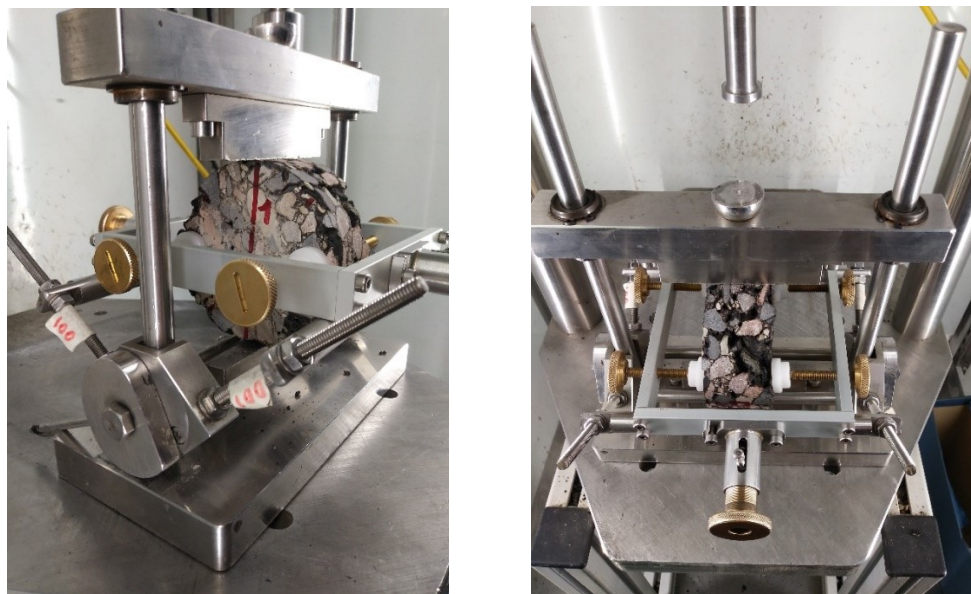
Figura 2.23: schema di distribuzione dei carichi durante la prova

Mentre la barra inferiore è fissata saldamente al piatto d'acciaio di base, quella superiore è connessa al sistema di carico attraverso una sfera d'acciaio che garantisce l'applicazione di una forza assiale.

La cella di carico del sistema misura la forza applicata dal dispositivo pneumatico ad ogni ciclo (la procedura consiste in 10 impulsi di condizionamento e 5 impulsi di prova vera e propria).

Il sistema di misurazione della deformazione deve essere in grado di misurare le elongazioni orizzontali massime, perpendicolarmente alla direzione di applicazione del carico; pertanto due trasduttori di spostamento sono montati su un supporto rigido fissato al provino in posizione diametralmente opposta. Il sistema di misura (LVDT), è capace di misurare lo spostamento diametrale orizzontale provvisorio massimo del campione, risultante dall'impulso applicato in direzione verticale perpendicolare. L'elongazione orizzontale massima istantanea registrata deve essere pari alla variazione nel diametro orizzontale nel campione; la suddetta variazione si genera come conseguenza dell'impulso applicato.

I due trasduttori differenziali lineari variabili (LVDT) sono montati diametralmente l'uno di fronte all'altro in un telaio rigido sul quale sono posizionati quattro morsetti che bloccano il telaio al provino. Il telaio non si deve distorcere quando i morsetti sono applicati al campione e non deve essere sorretto durante il test dalla gabbia esterna. È importante che il telaio sia posto nella corretta posizione evitando contatti che risulterebbero nocivi al fine di ottenere una corretta misurazione (figura 2.24, figura 2.25).



**Figura 2.24:** posizionamento del provino nel castelletto utilizzato per sorreggerlo all'interno dell'apparecchiatura (mancano ancora i due trasduttori per la misura delle deformazioni)

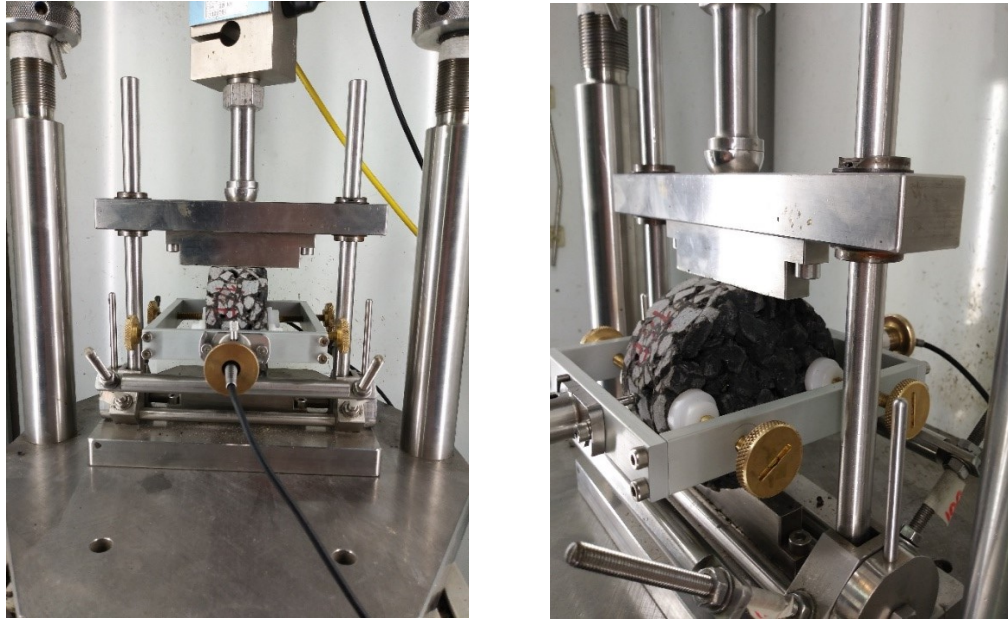


Figura 2.25: macchina di prova pronta per avviare l'esecuzione del test; in particolare si vede chiaramente uno dei due trasduttori e il castelletto utilizzato per sorreggerli

Il carico verticale induce nel provino sia tensioni verticali di compressione, sia tensioni orizzontali di trazione. L'intensità delle tensioni varia lungo i diametri, ma risulta massima al centro del provino. La prova viene eseguita a controllo di deformazione (figura 2.26) con una deformazione massima imposta (in tale sede di sperimentazione, è stata imposta una deformazione massima obiettivo pari a 3 micron, di entità minore rispetto alle usuali pratiche del test su provini di conglomerato chiuso (solitamente 5 micron)).

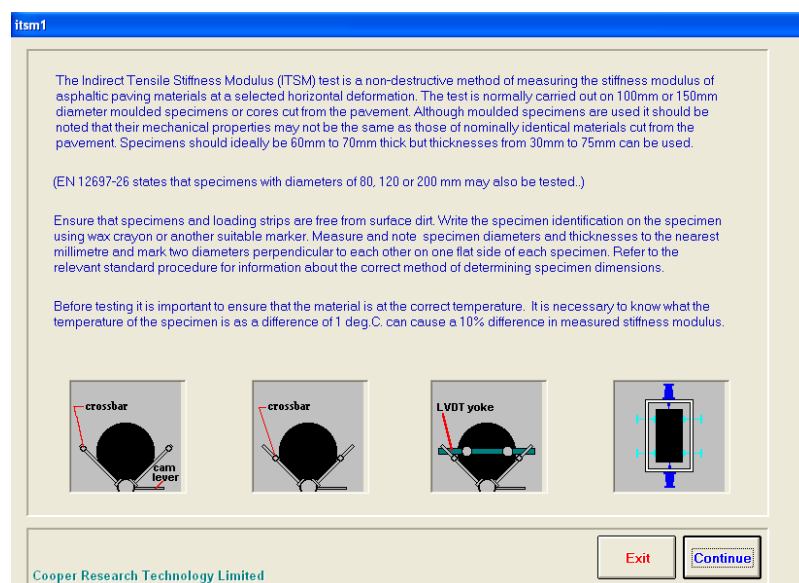


Figura 2.26: schermata iniziale della prova di misura del modulo di rigidità

Secondo la normativa a cui si fa riferimento, il modulo di rigidezza viene ricavato attraverso la seguente formula:

$$ITSM = \frac{F}{z \cdot h} (v + 0.27)$$

dove

- ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus) è il modulo di rigidezza [MPa];
- F rappresenta il valore massimo del carico applicato [N];
- z è l'allungamento misurato lungo il diametro orizzontale [mm];
- h è lo spessore medio del provino [mm];
- $\nu$  è il coefficiente di Poisson.

La prova ha inizio inserendo i parametri di prova (figura 2.27, figura 2.28, figura 2.29), che nel seguente caso sono:

- dimensioni del provino da testare (altezza e diametro, tabella 2.12);
- temperatura di prova fissata a 20°C;
- coefficiente di Poisson impostato pari a 0.35;
- rise-time (durata dell'impulso, necessario affinché il carico aumenti dal valore zero al valore massimo) pari a 124 ms;
- deformazione orizzontale obiettivo pari a 3  $\mu\text{m}$ ;
- numero dei cicli di carico in fase di condizionamento pari a 10;
- numero di cicli di carico in fase di calcolo del modulo pari a 5 (test vero e proprio).

Parameter	Value
Test temperature (°C)	20.0
Specimen diameter (mm)	94.9
Specimen thickness (mm)	41.18
Poisson's ratio	0.35
Target rise-time (ms)	124
Target horizontal deformation (microns)	3
Number of conditioning pulses	10

Figura 2.27: schermata "Data entry" della prova ITSM, in cui sono stati inseriti i dati iniziali

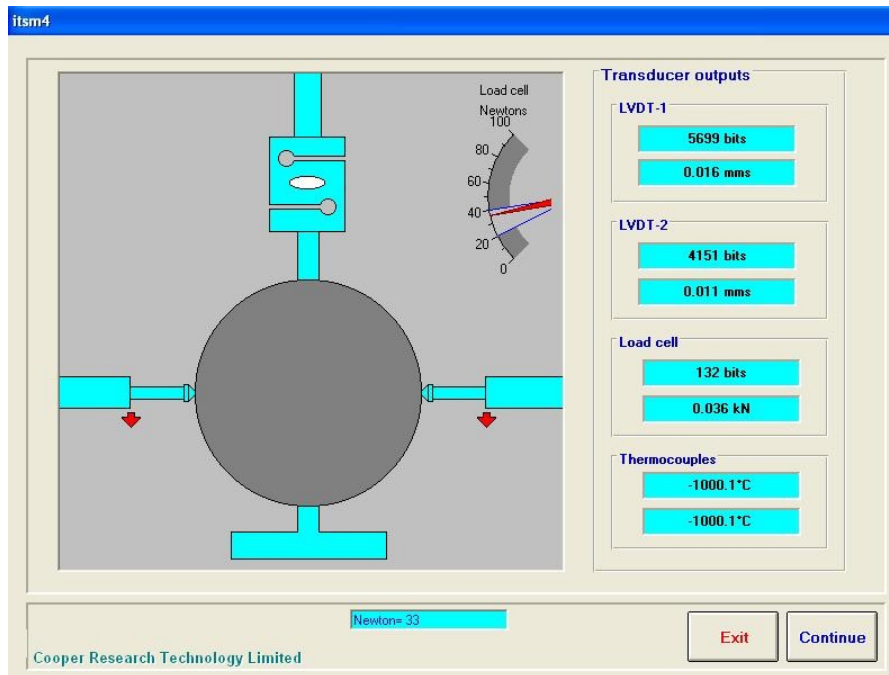


Figura 2.28: schermata di regolazione dei trasduttori

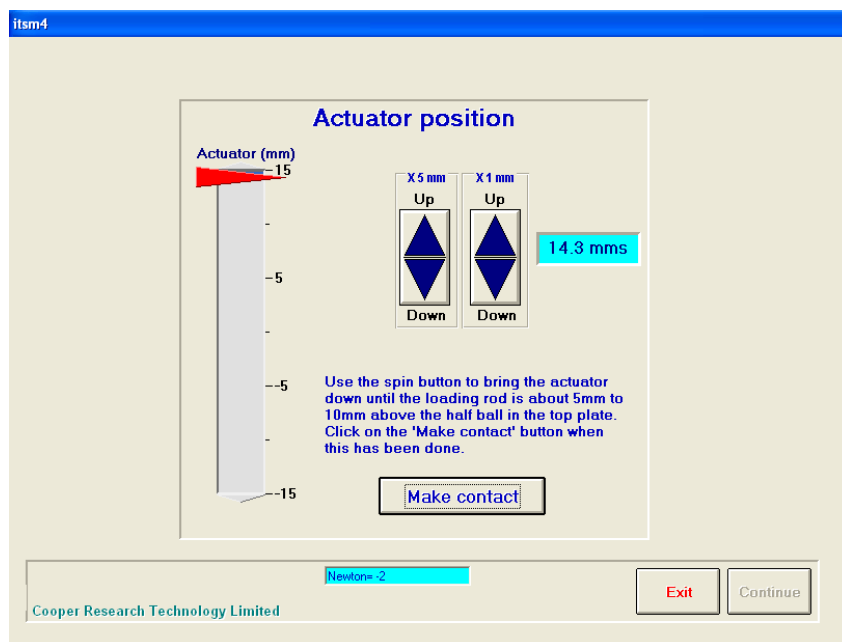


Figura 2.29: schermata "Actuator position", dove il pistone trova il contatto ed è pronto per applicare il carico (inoltre subito dopo, la macchina controlla che i trasduttori non si siano spostati a causa del contatto del pistone con la barra)

Successivamente, selezionato un tempo d'incremento di carico ed uno spostamento orizzontale di riferimento (target deformation), il dispositivo pneumatico applica un numero prefissato di impulsi al provino per calibrare l'ampiezza dell'impulso necessario a raggiungere la deformazione impostata (in questo caso 10) (figura 2.30).



Completati i primi cicli, inizia l'esecuzione vera e propria test che consiste nell'applicazione di almeno altri cinque impulsi, e quindi nel calcolo del modulo ad ogni ciclo e nel calcolo del valore medio dei 5 moduli (figura 2.31). La stessa operazione è in seguito effettuata cambiando la posizione del provino, cioè sollecitando il diametro ortogonale al precedente, cioè ruotato di 180° rispetto all'altro.

La geometria del provino è nota, la forza e la deformazione sono misurate, pertanto la tensione massima ed il modulo di rigidità sono automaticamente calcolati dal software ad ogni ciclo di carico.

La media dei valori medi calcolati nelle due posizioni prescelte rappresenta il modulo di rigidità del materiale sottoposto a prova. In definitiva, il modulo di rigidità ottenuto secondo la prova di trazione indiretta ITSM si può definire come la misura della capacità del materiale di distribuire un carico applicato verticale, tale da generare una deformazione elastica corrispondente ad un allungamento diametrico di prefissato valore.

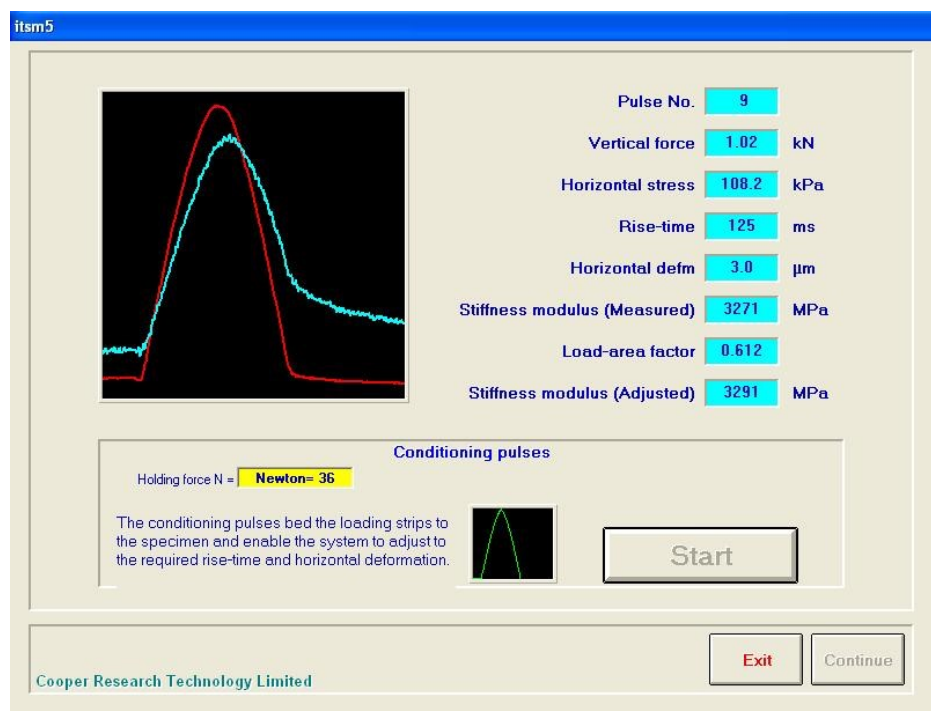


Figura 2.30: schermata relativa al condizionamento del provino mediante 10 impulsi (anticipa l'esecuzione della prova vera e propria)

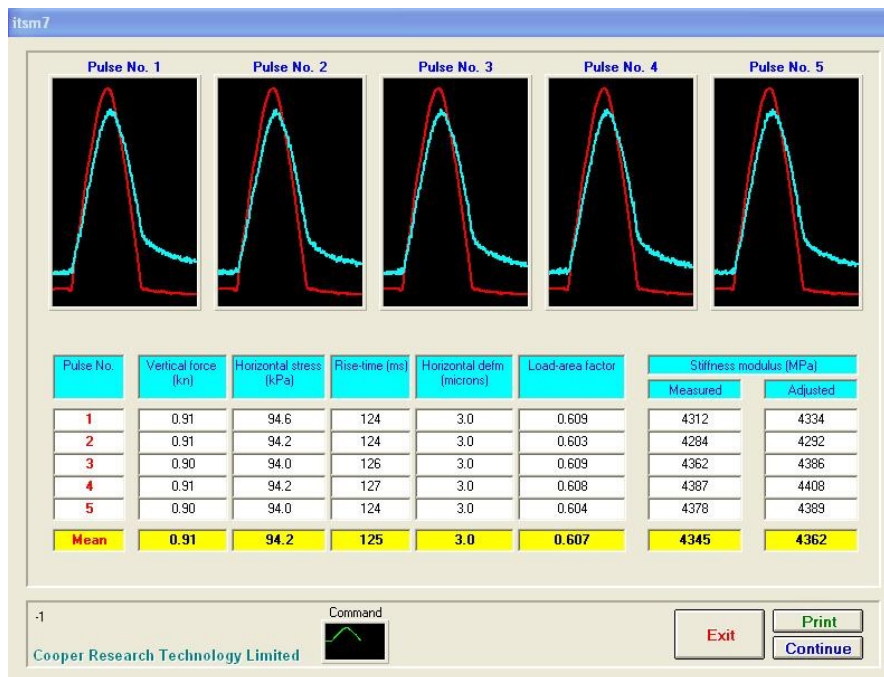


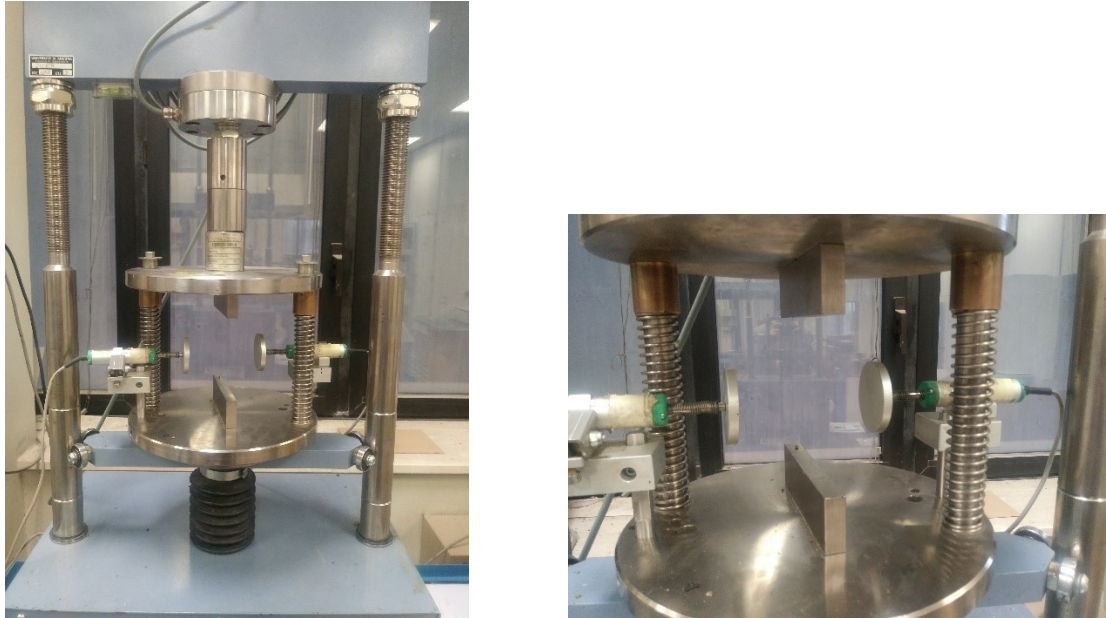
Figura 2.31: schermata relativa all'esecuzione del test e al calcolo del modulo di rigidità

### *Resistenza a trazione del conglomerato tramite prova di trazione indiretta*

Al fine di correlare il comportamento a fessurazione superficiale del conglomerato in sito alla resistenza a trazione della miscela, sono state eseguite delle prove di rottura a trazione indiretta.

L'apparecchiatura utilizzata per l'esecuzione di tale prova è costituita da un sistema di carico, formato da due piatti paralleli. La testa di carico inferiore è fissata ad una base munita di due guide verticali lungo le quali scorre, senza apprezzabile attrito mediante due manicotti, la testa di carico superiore. I piatti sono azionati da una pressa meccanica ad azione continua, di portata pari a 50 kN e dotata di un dispositivo che consente di realizzare una velocità di avvicinamento costante, indipendentemente dall'intensità del carico applicato. La pressa è dotata di una cella di carico che misura lo sforzo opposto dal provino al suo schiacciamento. Il carico viene trasferito al provino tramite due listelli di lunghezza maggiore o uguale alla lunghezza della linea di contatto del provino leggermente incavati in modo da avere una

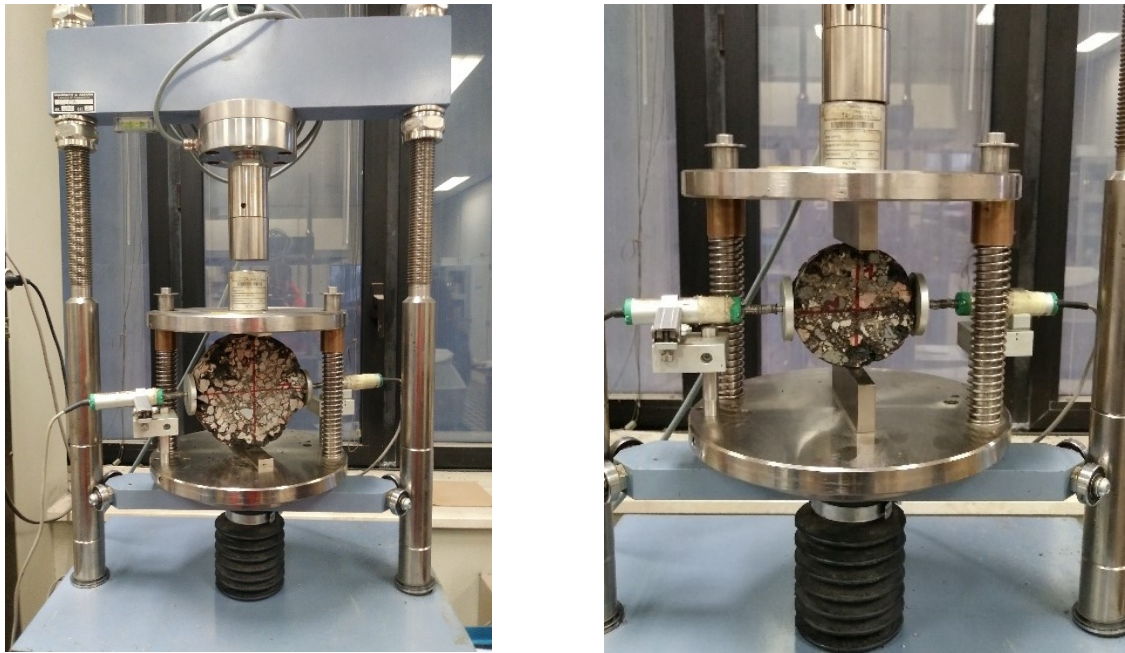
curvatura uguale a quella del provino (ovvero in questo caso quella dei provini di diametro 95 mm circa) (figura 2.32). Infatti nell'ambito di questa prova sono stati indagati provini cilindrici da 95 mm, prima testati tramite NAT per la determinazione del modulo di rigidezza elastica (nel numero di 19; per maggiori dettagli vedere la tabella di riepilogo, tabella 2.11).



**Figura 2.32:** pressa statica preparata per la prova di trazione indiretta (nel particolare i trasduttori per la misura della deformazione orizzontale montati in seguito)

La prova, in accordo con la norma UNI EN12697-23 [36], viene svolta in controllo di deformazione, imponendo al piatto inferiore una velocità di avanzamento costante (per la prova a trazione si è impostata una velocità relativamente veloce pari a 50 mm/min). Il provino viene collocato, ben centrato, tra i piatti della pressa, in maniera tale che il suo asse sia orizzontale, che l'asse del listello di carico superiore sia perfettamente parallelo a quello del listello inferiore e che entrambi siano contenuti nel piano verticale passante per l'asse del provino (figura 2.32).

La temperatura di prova deve essere selezionata nell'intervallo tra 5°C e 25°C. Inoltre, più precisamente, la macchina per la prova (non essendo dotata di camera climatica) deve essere posizionata in un locale con temperatura compresa tra 15°C e 25°C. In tale indagine sperimentale i provini cilindrici sono stati condizionati tramite camera climatica a 25 °C (4 ore circa).



**Figura 2.32:** provino posizionato per avviare la prova (sono visibili anche i trasduttori per la misura della deformazione orizzontale)

Inoltre, nella sperimentazione, si è proceduto all'installazione accessoria (rispetto alla prova standard) di due trasduttori per la misura supplementare della deformazione orizzontale (in aggiunta alla deformazione verticale all'aumentare del carico applicato).

Una volta posizionato il provino cilindrico ben allineato all'interno della pressa in modo che il carico viene trasmesso diametralmente attraverso le barrette di acciaio e sistemato attentamente i trasduttori a contatto con il provino (in direzione perpendicolare alle barrette di trasmissione del carico), si può azionare la prova: la macchina in autonomia inizia a far avanzare la pressa per trovare il contatto con il provino; una volta segnalato il contatto il carico si azzerava nuovamente e ha inizio il test vero e proprio dove la pressa procede con velocità di deformazione costante andando a misurare il carico applicato.

In tempo reale, la macchina può essere controllata tramite il software UTM II (nel quale si è aperto il file appropriato che si riferisce alla prova di trazione indiretta con utilizzo dei trasduttori) e una volta avviato il test, dopo aver inserito delle informazioni riguardanti le grandezze del provino indagato (diametro e spessore), è possibile visualizzare il tracciamento in forma grafica della relazione spostamento (verticale e orizzontale)-carico applicato (figura 2.33). Una volta raggiunto il picco la macchina di prova prosegue con l'applicazione del carico fino ad un valore in percentuale rispetto al carico massimo (si è scelto di impostare che il test si fermasse al 30% del picco di carico in modo da avere un grafico più ampio possibile, ma allo stesso tempo non rischiare di danneggiare i trasduttori).

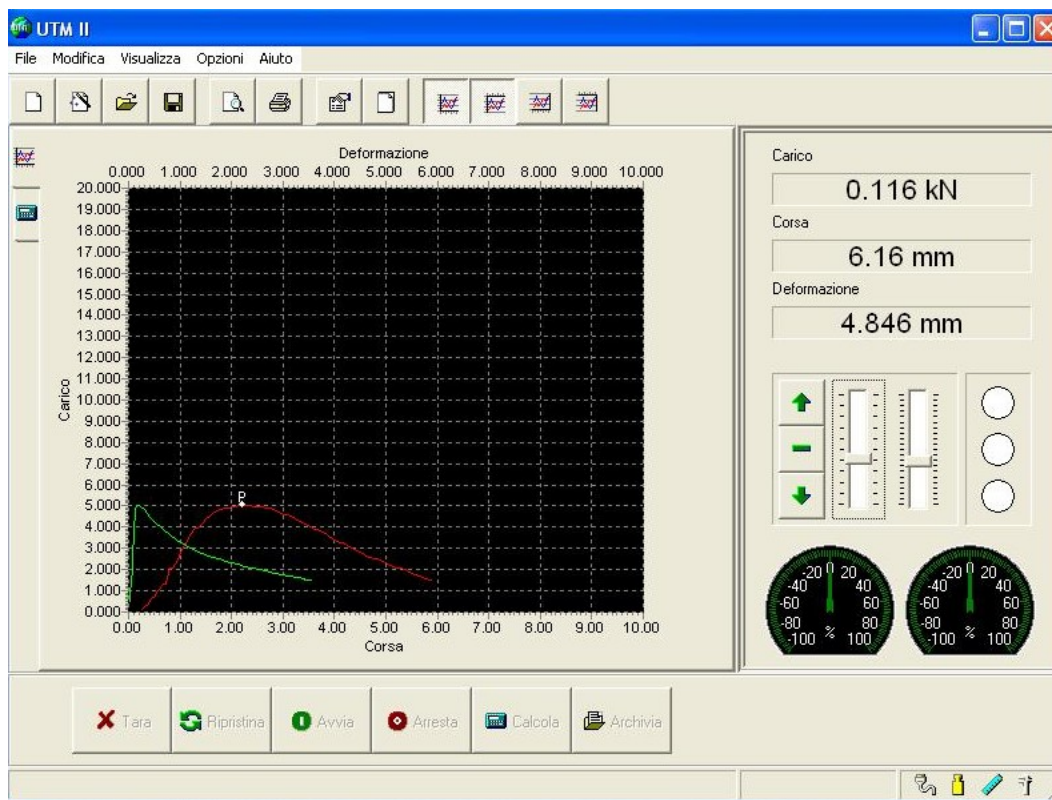


Figura 2.33: schermata di esecuzione della prova di trazione indiretta

In linea teorica, si può dire che esistono le seguenti tipologie di rotture (figura 2.34):

1. “Chiara rottura per trazione”, provino chiaramente rotto lungo una linea diametrale, eccetto eventualmente per piccole sezioni triangolari vicino alle bande di carico;
2. “Deformazione”, provini senza una linea di rottura per trazione chiaramente visibile;
3. “Combinazione”, provini con una linea di rottura per trazione limitata e vaste aree deformate vicino alle bande di carico.

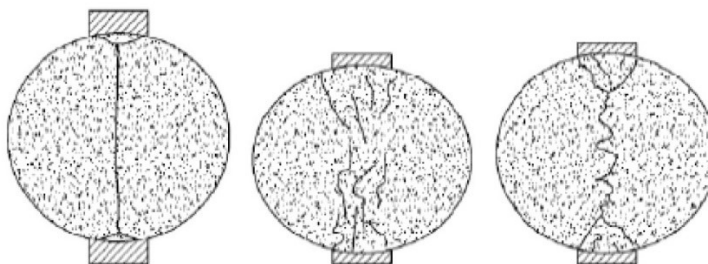


Figura 2.34: tipologie di rottura

La pressa è dotata di una cella di carico che misura lo sforzo opposto dal provino allo spostamento imposto. Viene quindi restituito in output direttamente dal software (figura

2.35) il valore della resistenza a trazione indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), mediante la seguente espressione analitica:

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi \cdot t \cdot d} \quad [MPa]$$

dove:

- Pmax rappresenta il carico massimo (N)
- t è l'altezza del provino [mm]
- d è il diametro del provino [mm]

Il software comunque archivia un file Access in cui sono riportati in forma tabulare i punti del grafico deformazione-carico applicato visualizzato in forma grafica nella finestra del software durante l'esecuzione della prova.

#	n°	Nome	Simbolo	Valore	Unità
1	1	Altezza media :	H	52.58	mm
1	2	Diametro medio :	D	94.86	mm
1	3	Deformazione unitaria di compressione :	ΔDc/D	0.020446	
1	4	Deformazione unitaria di trazione :	ΔDt/D	0.001585	
1	5	Carico di rottura a compressione :	P	6.966566	kN
1	6	Resistenza a trazione indiretta :	ITS	0.000889	kN/mm²

Figura 2.35: schermata di output in cui sono riportati alcuni valori significativi

Legato alla grandezza precedentemente riportata, si può determinare il coefficiente di trazione indiretta CTI (Indirect Tensile Coefficient) con la seguente espressione:

$$CTI = \frac{\pi \cdot d \cdot ITS}{2d_t} [MPa]$$

dove:

- $d_t$  è la deformazione verticale in corrispondenza del picco di carico [mm].

Di seguito si riportano delle immagini relative a dei provini rotti, al termine della prova descritta (figura 2.36).

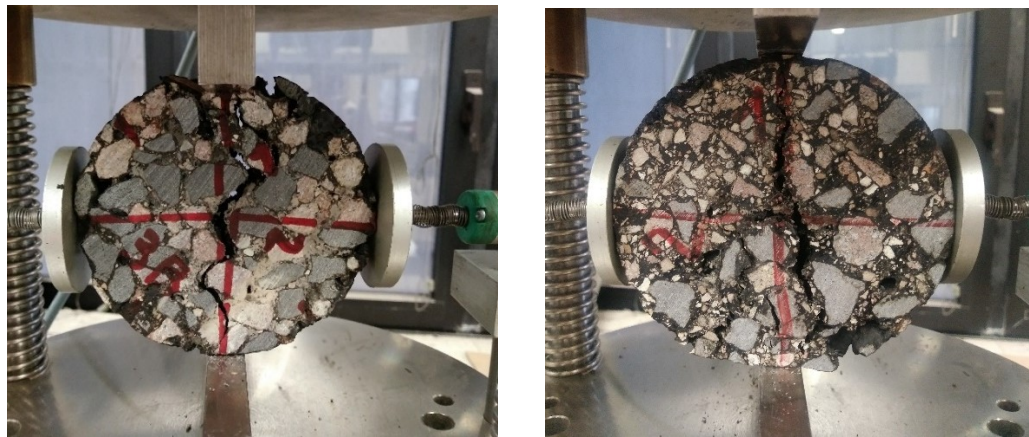


Figura 2.36: provini rotti al termine della prova

## 3. Analisi dei risultati

Nella presente sezione vengono riportati e commentati tutti i risultati ottenuti dall'esecuzione del programma sperimentale, descritto nel capitolo precedente.

Lo studio in esame (valutazione del fenomeno del top-down cracking sulla rete autostradale italiana) si configura come lo sviluppo di una parte di un più ampio programma di ricerca mirato all'elaborazione di un PMS (Pavement Management System), aggiornato in base alle particolarità della rete autostradale, e personalizzato per ASPI (Autostrade per l'Italia S.p.A.).

La presentazione dei risultati ottenuti, in relazione alla caratterizzazione della fessurazione da top-down sulla rete autostradale italiana, può essere divisa in due parti:

1. individuazione di una metodologia di riconoscimento della fessurazione da top-down in sito;
2. individuazione di una metodologia sperimentale, attuabile in laboratorio, finalizzata allo studio del comportamento del conglomerato nei riguardi del top-down cracking.

### 3.1 Individuazione della fessurazione da top-down in sito

Nella sezione presentata di seguito si riporteranno le procedure finalizzate all'individuazione di una valida metodologia di riconoscimento della fessurazione da top-down in sito. In particolare, il paragrafo si sviluppa in due parti:

- analisi statistica della concentrazione della fessurazione superficiale longitudinale rilevata lungo la rete-pilota, selezionata nell'ambito del progetto di aggiornamento del PMS autostradale;
- elaborazione di veri e propri criteri guida per la discriminazione delle varie tipologie di fessure superficiali, riscontrabili sulla superficie della pavimentazione autostradale.



### *Concentrazione della fessurazione superficiale sulla rete autostradale*

Tramite la visione dei fotogrammi acquisiti dall'ARAN (Automatic Road Analyzer) durante le operazioni di rilevamento della regolarità della superficie della pavimentazione, e visionabili all'interno del software "Google Earth Enterprise per Autostrade", il cui accesso riservato è stato concesso da ASPI, è stato possibile rilevare la presenza della fessurazione superficiale, in particolare il top-down cracking sui segmenti autostradali scelti come rete-pilota, discriminandolo rispetto alla fessurazione causata dallo strisciamento del cerchione a seguito di una foratura di uno pneumatico oppure rispetto ad altre tipologie di difetti superficiali longitudinali, come quelli costituiti dai giunti di stesa della pavimentazione. In particolare, è stato eseguito un rilievo del top-down cracking sulla corsia di marcia destra, registrando estensione e livello di gravità del dissesto. Inoltre, i risultati ottenuti in una prima fase preliminare sono stati rivisti pesantemente alla luce dei criteri di riconoscimento della fessurazione da top-down, elaborati solo in una fase successiva all'osservazione in laboratorio dei provini prelevati in sito.

La concentrazione generale della fessurazione da top-down rilevata in sito è espressa come:

$$TDC \% = \frac{l_{TDC}}{l_0} * 100$$

dove:

- $TDC \%$  è la concentrazione di top-down cracking rilevato in sito (sia in riferimento al lato sinistro della corsia di marcia lenta, sia in riferimento al lato destro);
- $l_{TDC}$  rappresenta l'estensione cumulata della fessurazione da top-down rilevata nel tratto in esame (sia in riferimento al lato sinistro della corsia di marcia lenta, sia in riferimento al lato destro);
- $l_0$  rappresenta la lunghezza del segmento autostradale considerato per il rilievo visivo.

La concentrazione della fessurazione relativa ai due lati della corsia di marcia lenta monitorata, inoltre, può essere formulata nel modo seguente:

$$TDC dx \% = \frac{l_{TDCdx}}{l_0} * 100$$

$$TDC sx \% = \frac{l_{TDCsx}}{l_0} * 100$$

dove:

- $TDC dx \% / TDC sx \%$  sono rispettivamente la concentrazione di top-down cracking rilevato in sito in riferimento al lato destro della corsia di marcia lenta e in riferimento al lato sinistro;
- $l_{TDCdx} / l_{TDCsx}$  rappresentano rispettivamente l'estensione cumulata della fessurazione da top-down rilevata nel tratto in esame in riferimento al lato destro della corsia di marcia lenta e in riferimento al lato sinistro;
- $l_0$  rappresenta la lunghezza del segmento autostradale considerato per il rilievo visivo.

Si sottolinea come il dato generale non è uguale alla somma tra la concentrazione riferita al lato destro e la concentrazione del TDC sul lato sinistro poiché non sono rari punti in cui sulla pavimentazione è stata rilevata una fessurazione da top-down in entrambi i lati della corsia. Tuttavia, in tale caso, nella formulazione della concentrazione generale del TDC l'estensione del dissesto non viene conteggiata due volte per uno stesso punto (anche se sono presenti fessure in entrambi i lati).

Inoltre, considerando i tre livelli di gravità del danno, formulati a priori in maniera qualitativa, è possibile formulare la concentrazione di TDC in sito, operando una differenziazione in base alla gravità del dissesto:

$$TDC1 dx \% = \frac{l_{TDC1dx}}{l_0} * 100$$

$$TDC2 dx \% = \frac{l_{TDC2dx}}{l_0} * 100$$

$$TDC3 dx \% = \frac{l_{TDC3dx}}{l_0} * 100$$

dove:

- $TDC1 dx \% / TDC2 dx \% / TDC3 dx \%$  sono la concentrazione di top-down cracking rilevato in sito in riferimento al lato destro della corsia di marcia lenta, caratterizzato rispettivamente da un livello di danno minimo (LEVEL1), intermedio (LEVEL2) e severo (LEVEL3);
- $l_{TDC1dx} / l_{TDC2dx} / l_{TDC3dx}$  rappresentano l'estensione cumulata della fessurazione da top-down rilevata nel tratto in esame in riferimento al lato destro della corsia di

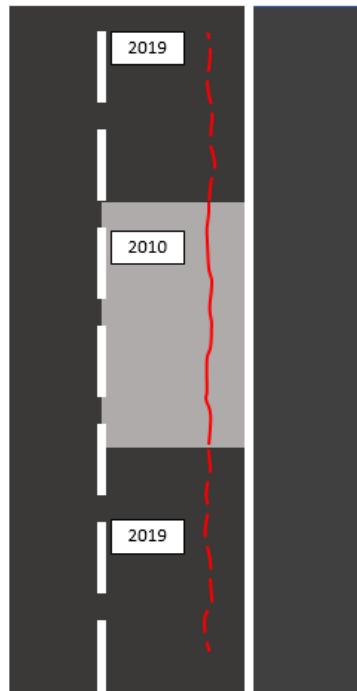
marcia lenta, caratterizzato rispettivamente da un livello di danno minimo (LEVEL1), intermedio (LEVEL2) e severo (LEVEL3);

- $l_0$  rappresenta la lunghezza del segmento autostradale considerato per il rilievo visivo.

L'elaborazione, alla medesima maniera, può essere eseguita riferendosi alla fessurazione da top-down rilevata sul lato sinistro della corsia di marcia lenta (per brevità espositiva, non verrà riportata la formulazione specifica)

A seguito dei criteri di riconoscimento elaborati a posteriori, durante la fase di visione delle carote prelevate in sito, le percentuali di presenza della fessurazione da top-down sulla rete autostradale pilota sono state riviste al ribasso, poiché diverse fessure longitudinali, ascritte in un primo momento come top-down cracking, si sono rivelate, nella seconda fase, fessure relative a cause differenti, come quelle dovute allo strisciamento del cerchione a seguito della foratura di uno pneumatico. L'elaborazione statistica definitiva dimostra in ogni caso come la tipologia di fessurazione da top-down sia caratterizzata da una presenza importante sulla rete-pilota autostradale tale da non poter essere trascurata nell'ambito di un moderno metodo di dimensionamento e di un valido piano di manutenzione della pavimentazione stradale.

Nel dettaglio, nei segmenti caratterizzati da un livello di traffico notevole (A1 MILANO-NAPOLI Ponte Fiume Enza- Allacciamento A14), si rilevano in generale le percentuali più alte di concentrazione della presenza di top-down cracking. È necessario tuttavia contestualizzare tale situazione: il dato è in parte falsato e verosimilmente sarebbe risultato più alto se non si fossero realizzati diversi numerosi interventi di risanamento della pavimentazione, che negli ultimi anni hanno interessato in modo estensivo la pavimentazione del tratto dell'A1, e che hanno nascosto il top-down cracking sottostante (forse solo in parte risanato) al rilievo visivo. A testimonianza di ciò, non sono rari punti di esigua estensione caratterizzati da una pavimentazione di età passata in cui si scorge top-down cracking posta tra due nuove stese (presumibilmente la fessurazione in parte visibile nel tratto più vecchio, è coperta dal nuovo strato di usura nelle progressive immediatamente adiacenti) (figura 3.1).



**Figura 3.1:** tratto di età maggiore posto tra due nuove stese: la fessurazione da top-down visibile nel segmento più vecchio (linea continua) verosimilmente prosegue celato sotto il conglomerato di nuova costruzione (linea tratteggiata)

Inoltre, osservando i dati di concentrazione del top-down cracking, distinti per livello di gravità, si vede che una fessurazione di livello grave è presente sostanzialmente solo nel tratto dell'A1, proprio in quei tratti ammalorati, non soggetti alle operazioni di risanamento sopra descritte, dove la fessura longitudinale è evoluta in una vera e propria fessurazione a ragnatela, causando lo sfondamento della pavimentazione in prossimità della striscia di impronta dello pneumatico.

Rispetto a quanto riscontrato sul tratto autostradale dell'A1 MILANO-NAPOLI (Ponte Fiume Enza- All-A14), la concentrazione di fessurazione da top-down rilevata sul tratto della rete-pilota dell'A14 BOLOGNA-TARANTO si attesta su valori decisamente minori: ciò può essere spiegato in maniera ragionevole dall'età recente della pavimentazione, nonostante i volumi di traffico transitanti sono comunque importanti, a supporto di come sia i volumi di traffico ma anche l'invecchiamento della pavimentazione giochino un ruolo fondamentale per lo scaturirsi del top-down cracking sulla rete. In tal senso, ragionamento analogo può essere presentato per i risultati riferiti al tratto della DIRAMAZIONE RAVENNA, dove nonostante i volumi di traffico sono poco rilevanti (rispetto ad A1 e A14), la concentrazione di fessurazione superficiale ascrivibile al top-down cracking raggiunge valori importanti, presumibilmente per l'età poco recente della pavimentazione e per il sopraggiungere di altri

fattori secondari (difetti di costruzione, stress termici) che hanno in ogni modo favorito lo sviluppo del dissesto.

Nel tratto di montagna, caratterizzato dall'utilizzo di uno strato di usura chiuso (A1 MILANO-NAPOLI Sasso Marconi- Allacciamento Variante di Valico) non sono state praticamente osservate fessure longitudinali da top-down: ciò attesta come la presenza di un conglomerato poroso (strato drenante) rappresenti un punto di debolezza nelle proprietà della miscela, determinante nella formazione del top-down cracking.

Non sono state riscontrate correlazioni particolari tra la presenza della fessurazione e la direzione di marcia o la larghezza della carreggiata (tratto a tre corsie e tratto a quattro corsie): tuttavia è stata rilevata presenza di fessure superficiali da top-down anche nella seconda corsia di marcia della carreggiata a quattro corsie, seppur in maniera più sporadica (dato osservato qualitativamente non quantificato). Allo stesso modo, non sembrano sussistere relazioni particolari tra la fessurazione rilevata in prossimità dell'impronta di carico destro e la fessurazione sul lato sinistro: infatti in certi segmenti la concentrazione del dissesto sull'impronta dello pneumatico sinistro prevale su quella destra, in altri casi il trend è invertito.

Di seguito si riportano grafici riepilogativi in merito alla concentrazione del top-down cracking rilevato nell'intera larghezza della corsia di marcia destra (figura 3.2), divisi in base al lato (destro e sinistro) (figura 3.3), distinti in base al livello di gravità del danno (figura 3.4 a-b-c).

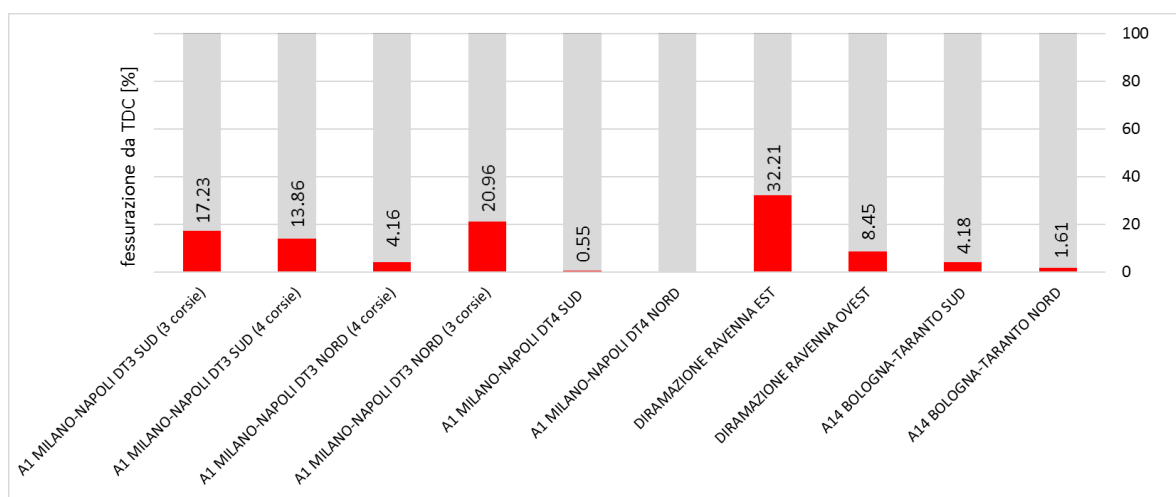


Figura 3.2: fessurazione da TDC (sull'intera larghezza della corsia di marcia destra), nei segmenti autostradali monitorati

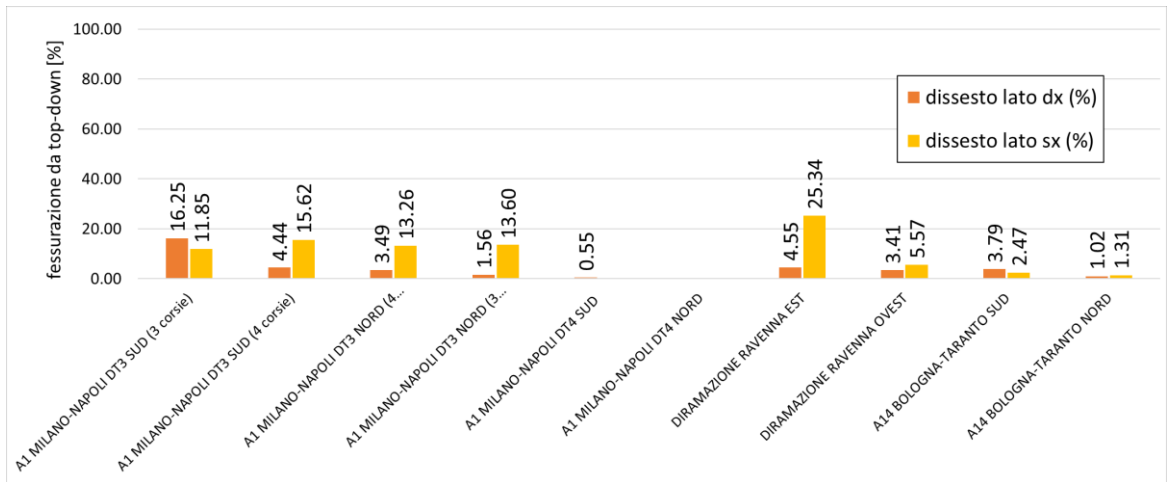


Figura 3.3: fessurazione da top-down, sulla striscia di impronta dello pneumatico destro e sinistro, nelle tratte autostradali analizzate

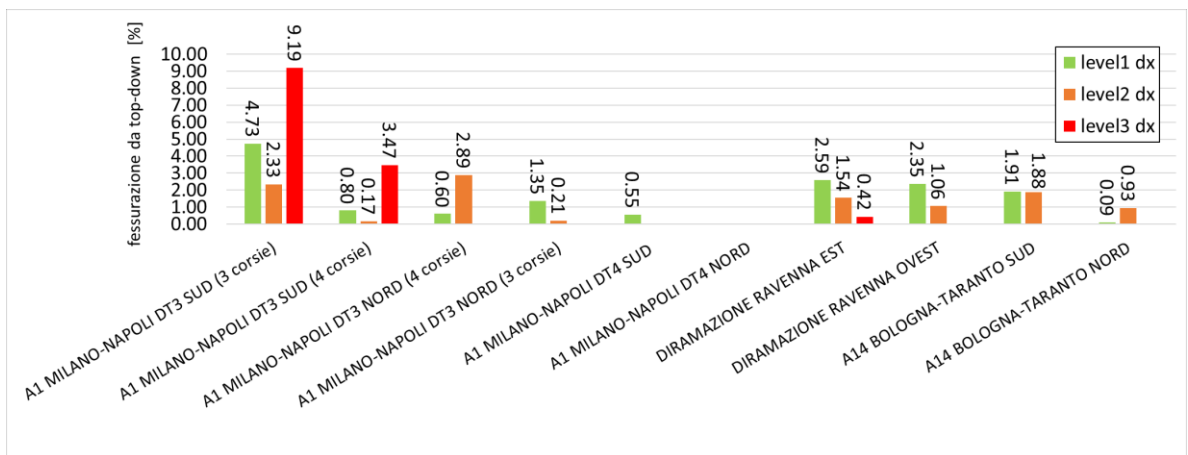


Figura 3.4 a: fessurazione da top-down, sulla striscia di impronta dello pneumatico destro, distinta per livelli di gravità del danno

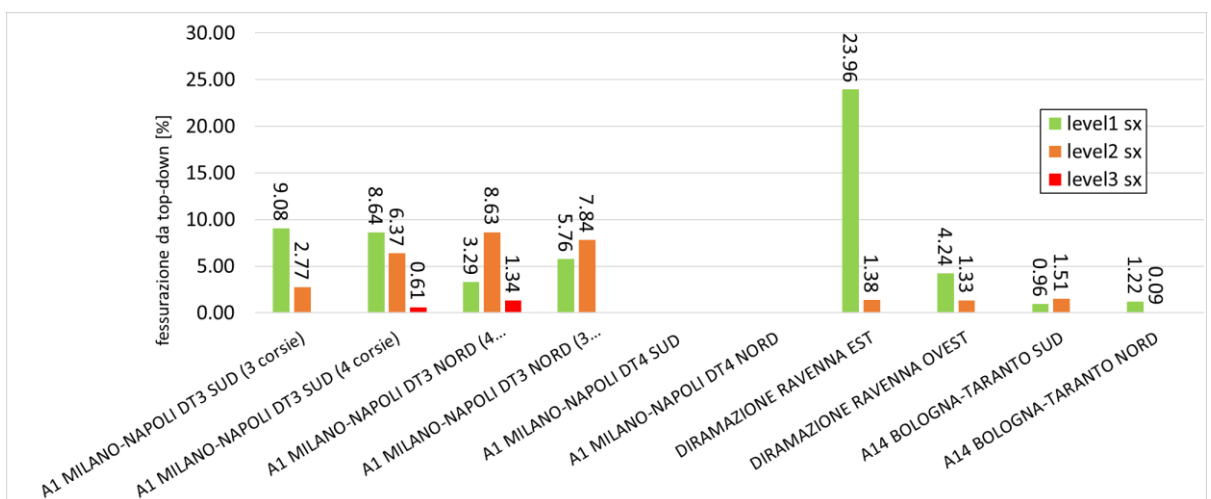
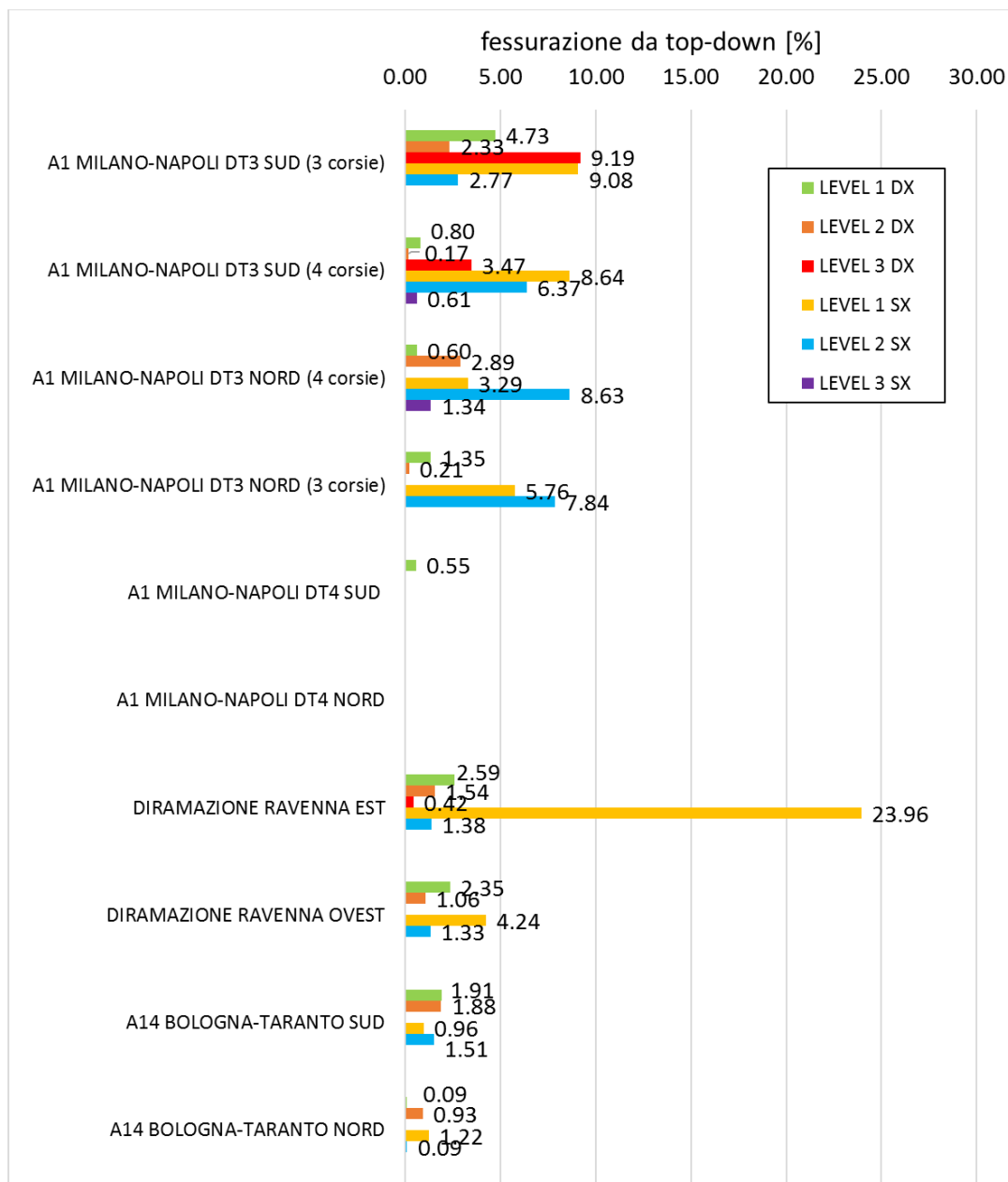


Figura 3.4 b: fessurazione da top-down, sulla striscia di impronta dello pneumatico sinistro, distinta per livelli di gravità del danno



**Figura 3.4 c:** fessurazione da top-down, sulla striscia di impronta dello pneumatico destro e sinistro, distinta per livelli di gravità del danno

Durante il rilievo visivo nei segmenti autostradali selezionati per la rete-pilota, è stata riscontrata un'importante presenza di fessure dovute alla foratura dello pneumatico di un mezzo pesante, il cui cerchio, a seguito dell'asportazione della gomma, va a scalfire la pavimentazione e lascia una serie di fessure in superficie molto simili a quelle prodotte in un classico meccanismo di top-down cracking. Da un'elaborazione statistica a riguardo, risulta che tale situazione non sia rara ma addirittura sia caratterizzata generalmente da una concentrazione maggiore rispetto a quella associata alla fessurazione da top-down (figura

3.5, figura 3.6). La concentrazione della fessurazione dovuta a foratura di uno pneumatico può essere espressa nel modo seguente:

$$FFP \% = \frac{l_{FFP}}{l_0} * 100$$

dove:

- $FFP \%$  è la concentrazione della fessurazione dovuta a foratura di uno pneumatico rilevata in sito (nella porzione di pavimentazione relativa alla corsia di marcia lenta);
- $l_{FFP}$  rappresenta l'estensione cumulata della fessurazione da foratura rilevata nel tratto in esame;
- $l_0$  rappresenta la lunghezza del segmento autostradale considerato per il rilievo visivo.

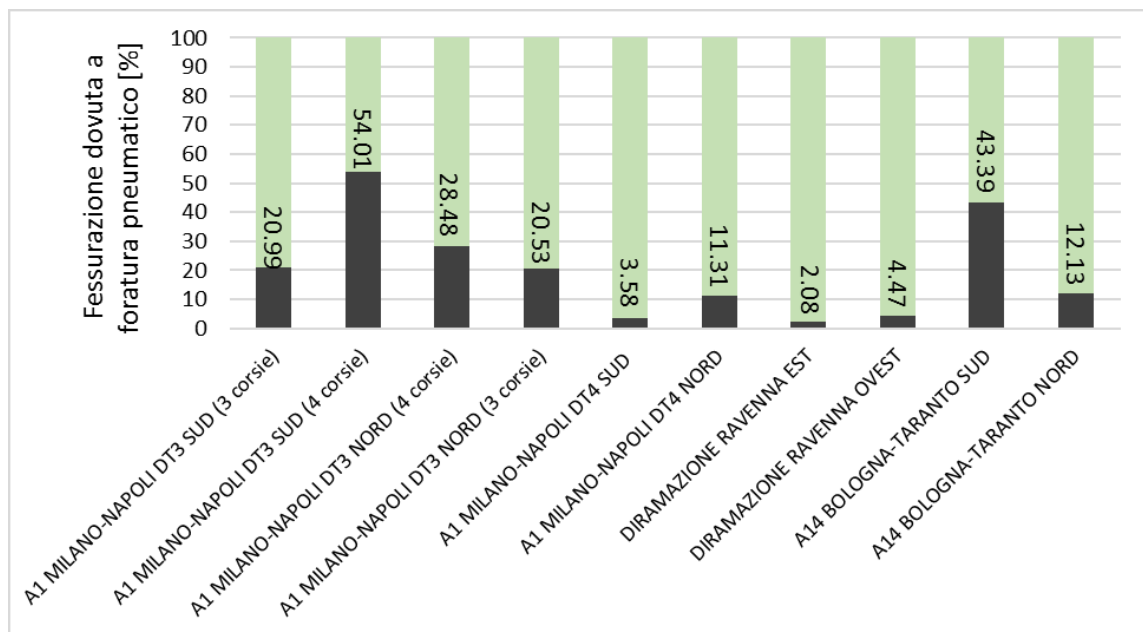
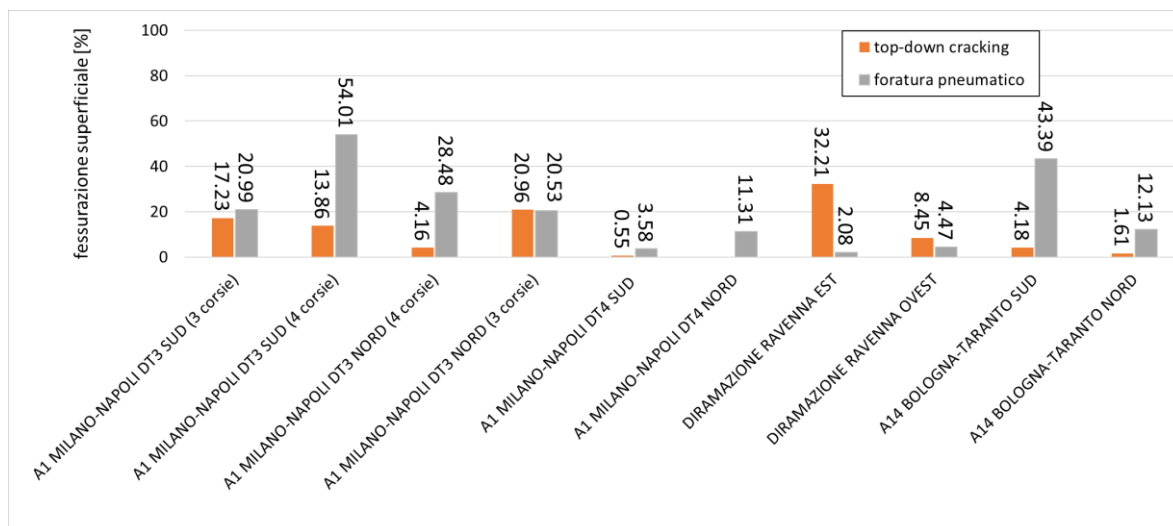


Figura 3.5: fessurazione causata dalla foratura di uno pneumatico





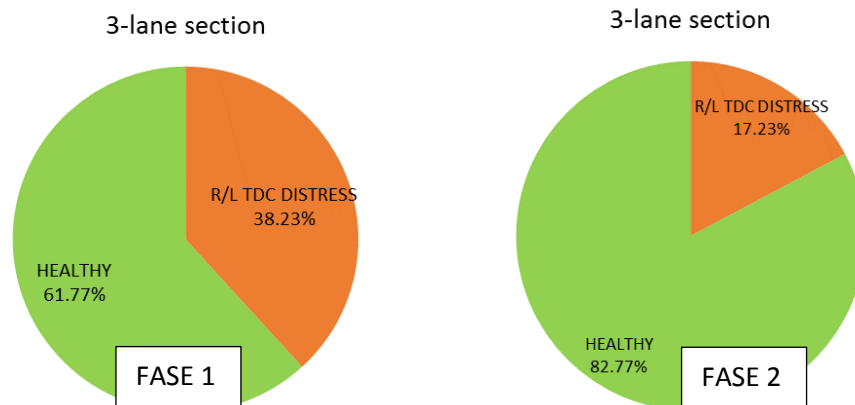
**Figura 3.6:** fessurazione superficiale distinta in top-down cracking e fessurazione causata dalla foratura di uno pneumatico

### *Linee guida per il corretto riconoscimento della fessurazione superficiale in sito*

Una corretta individuazione della fessurazione da top-down presente in sito è fondamentale per un valido piano di rilievo e gestione dei dissesti della rete autostradale. Dall'ispezione visiva in laboratorio delle carote prelevate nei punti selezionati, è stato osservato come sulla pavimentazione sia possibile scorgere diverse tipologie di fessurazione superficiale longitudinale, ma non tutte ascrivibili al genere del top-down cracking. In particolare, nella serie di campioni prelevati in corrispondenza dell'impronta di carico sulla pavimentazione affetta da fessurazione superficiale longitudinale, solo nel numero di due campioni si sono rilevati caratterizzati da una fessurazione da top-down vera e propria, che si sviluppa dalla superficie verso gli strati più profondi, mentre le altre fessure osservate nel rilievo visivo tramite fotogrammi ARAN si sono dimostrate verosimilmente incisioni dovute alla foratura di uno pneumatico, poiché non sono ben visibili cricche che si propagano in profondità (vedi tabelle di riepilogo programma sperimentale, tabella 2.6, tabella 2.7, tabella 2.10).

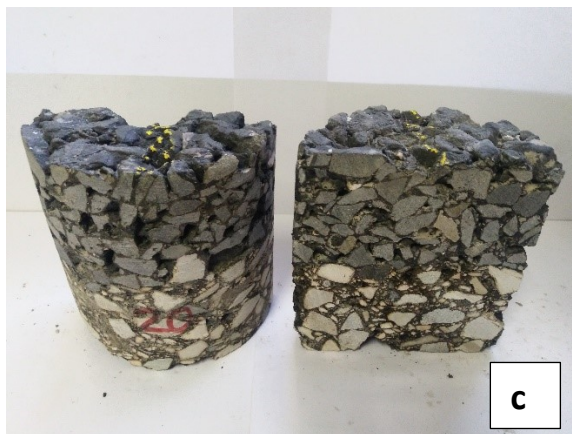
Dagli esiti dell'osservazione dei campioni prelevati, che sono stati tagliati nella direzione diametrale perpendicolare all'eventuale fessura longitudinale per una più efficace ispezione visiva, sono stati elaborati a posteriori dei criteri validi per il riconoscimento della fessurazione da top-down in sito, operando una discriminazione rispetto alle altre tipologie di fessure superficiali longitudinali, riscontrabili sulla pavimentazione autostradale. A testimonianza di come un'individuazione erronea del top-down cracking possa inficiare in maniera determinante sui risultati di una campagna di rilievo dei dissesti, nell'ambito di un

piano di gestione e manutenzione, si riporta il confronto, relativo ad un tratto autostradale analizzato, tra le elaborazioni statistiche riguardanti la concentrazione della fessurazione da top-down sulla rete, scaturite rispettivamente in una prima fase tramite visione dei fotogrammi ARAN e in una seconda fase applicando le semplici linee guida finalizzate al riconoscimento della fessura, individuate a posteriori dall'osservazione delle carote (figura 3.7).

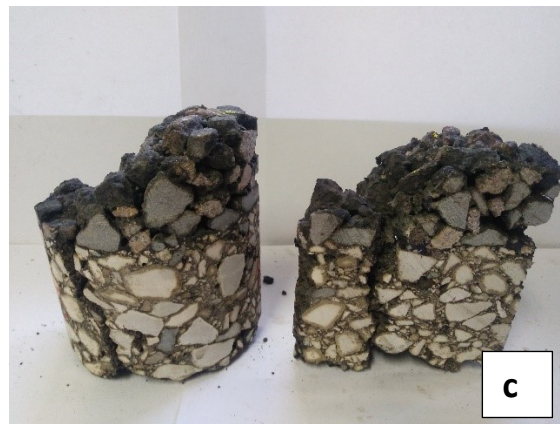


**Figura 3.7:** concentrazione del top-down cracking rilevata sulla rete (tratto A1 MILANO-NAPOLI Ponte Fiume Enza- All.A14, direzione SUD, tratto a 3 corsie), in una prima fase e in una seconda fase, applicando i criteri di riconoscimento (i dati sono stati rivisti al ribasso)

Ciò che si deduce dalle elaborazioni statistiche relative alla concentrazione del top-down cracking sulla rete e dall'osservazione delle carote è che non tutte le fessure che appaiono come dissesti superficiali con sviluppo longitudinale, di fatto si rivelano fessure da top-down. In particolare nelle carote prelevate in sito, molti provini non erano caratterizzati da top-down, ma da dissesti longitudinali ben visibili durante il rilievo visivo (tramite fotogrammi ARAN), che si sono poi, nella seconda fase, dimostrati incisioni prettamente superficiali (verosimilmente causate dalla foratura di uno pneumatico) (figura 3.8 a-b-c, figura 3.9 a-b-c).



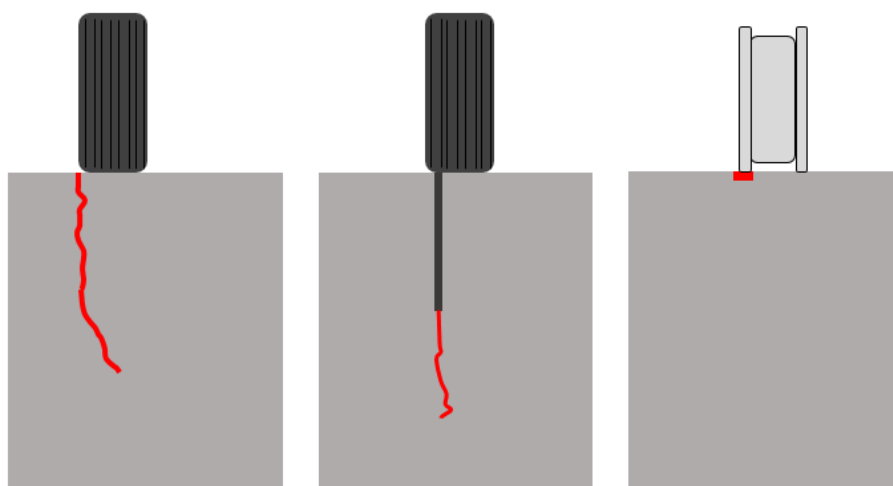
**Figura 3.8:** fotogramma ARAN nel quale è ben visibile la fessura superficiale (a), campione prelevato in sito in cui non è visibile nessuna cricca che si propaga in profondità (b-c)



**Figura 3.9:** fotogramma ARAN nel quale è ben visibile la fessura superficiale (a), campione prelevato in sito in cui è visibile la cricca da top-down che si propaga in profondità (b-c)

All'interno della rete autostradale è possibile individuare tre tipologie di fessurazione superficiale che si sviluppano prevalentemente in direzione longitudinale (figura 3.11):

- fessurazione da top-down;
- fessurazione causata dallo strisciamento del cerchione di un mezzo pesante a seguito della foratura di uno pneumatico;
- fessurazione dovuta alla presenza di giunti di stesa del conglomerato.



**Figura 3.10:** schematizzazione delle tipologie di fessurazione superficiale longitudinale riscontrabile sulla rete autostradale: top-down cracking (a); giunto di stesa (b); fessura causata da foratura di uno pneumatico (c)

Allo scopo di operare una discriminazione tra le diverse tipologie di fessurazione superficiale sopra elencate, a valle del lavoro di rilievo visivo della rete tramite ARAN view e ispezione dei campioni prelevati in sito, sono scaturite diverse osservazioni, inquadrabili come dei criteri di riconoscimento della fessurazione superficiale longitudinale in sito:

- le fessure dovute a foratura di uno pneumatico sono causate in particolare dal contatto del cerchione della ruota del mezzo pesante in cui si verifica la completa o parziale espulsione accidentale della gomma;
- vi è la tendenza diffusa da parte dei mezzi pesanti di proseguire la marcia, nonostante il problema meccanico alla ruota, anche per diversi chilometri, allo scopo di uscire dalla rete autostradale al primo casello utile (non sono quindi rare fessure dovute ad una foratura di estensione pari a diversi chilometri);
- numerose fessure causate da foratura sono riconoscibili in maniera immediata poiché è visibile la manovra del mezzo pesante che tende ad accostarsi verso la corsia di emergenza o verso una piazzola di sosta (figura 2.8 a-b);
- numerose fessure causate da foratura sono riconoscibili in maniera immediata poiché appaiono visivamente a tratti (verosimilmente poiché vi è un contatto discontinuo tra la pavimentazione e il cerchione, a causa della non completa espulsione della gomma dello pneumatico forato) (figura 2.8 c);
- una tipica fessurazione da top-down appare su larga scala rettilinea nella direzione longitudinale, ma su piccola scala presenta una certa irregolarità di sviluppo superficiale;

- una tipica fessurazione da foratura, al contrario, appare su piccola scala come un'incisione precisamente rettilinea sulla pavimentazione priva di irregolarità (nel rilievo visivo delle carote prelevate si individuano degli aggregati del conglomerato di usura scalfiti dal passaggio del cerchione in metallo, figura 3.11 a-b);
- solitamente fessure da foratura possono raggiungere senza interruzioni anche distanze considerevoli (2-3 km), mentre una fessura da top-down raggiunge distanze massime, senza alcuna interruzione di sviluppo, minori (in letteratura si fissa una distanza limite di 300 m; già al raggiungimento di un'estensione di 150-200 m si assiste ad un'evoluzione della fessura in "alligator cracking");
- talvolta una fessura da top-down è riconoscibile per la presenza attigua di altre fessure di minore entità parallele alla principale (denominate "sister cracks");
- al contrario di ciò che accade nel caso di una fessura dovuta ad una foratura (o giunto di stesa), il top-down cracking può evolvere in una fase successiva in una vera e propria fessurazione "a ragnatela", causando lo sfondamento della pavimentazione in prossimità della striscia di impronta dello pneumatico;
- si possono rilevare anche fessure superficiali longitudinali costituite dai giunti di stesa della pavimentazione, solitamente in posizioni atipiche rispetto alla striscia di impronta dello pneumatico (dove si sviluppa il top-down cracking), ma non mancano casi in cui la posizione di sviluppo è la medesima di una tipica fessurazione da top-down (caso di giunto per allargamento carreggiata e inserimento quarta corsia di marcia, oppure caso di stesa di una corsia di emergenza di larghezza modesta, ad esempio in prossimità di viadotti o rampe di uscite o entrate);
- su piccola scala fessure costituite da giunti di stesa si configurano come delle vere e proprie cricche che penetrano nello strato legato (al contrario della fessurazione da foratura e allo stesso modo del TDC), ma presentano una irregolarità minore rispetto alle fessure da top-down;
- la maggior parte delle fessure costituite da giunti di stesa sono riconoscibili in modo evidente per la loro posizione in prossimità della segnaletica di delimitazione tra la corsia di marcia destra e la corsia di marcia centrale (tale tipologia di fessurazione si riscontra nella quasi totalità delle progressive analizzate; farne quindi una statistica sulla concentrazione non è strettamente significativo: ad esempio solo per un tratto pari all' 1.05% nel segmento analizzato relativo alla carreggiata a 3 corsie, direzione sud, A1 MILANO-NAPOLI Ponte Fiume Enza-All.A14 vi sono giunti di stesa in posizione atipica tale da poterne causare un errato riconoscimento);

- dal punto di vista operativo, per cogliere al meglio una fessura da top-down sulla superficie del provino, è consigliato prelevare campioni tramite carote di diametro 150 mm, poiché con provini di diametro minore c'è il rischio (a causa dello sgranamento dovuto alle operazioni di carotaggio) di non avere una buona percezione della fessura sulla superficie del campione.



Figura 3.11: aggregato scheggiato dal passaggio del cerchione a seguito della foratura

Di seguito si riportano alcune immagini esemplificative nelle quali è possibile ritrovare le osservazioni presentate in precedenza (figura 3.12 a-b, figura 3.13 a-b, figura 3.14).



Figura 3.12 a: fessura da top-down (sono presenti anche delle fessure secondarie parallele denominate in letteratura "sister cracks")



Figura 3.12 b: fessura da top-down

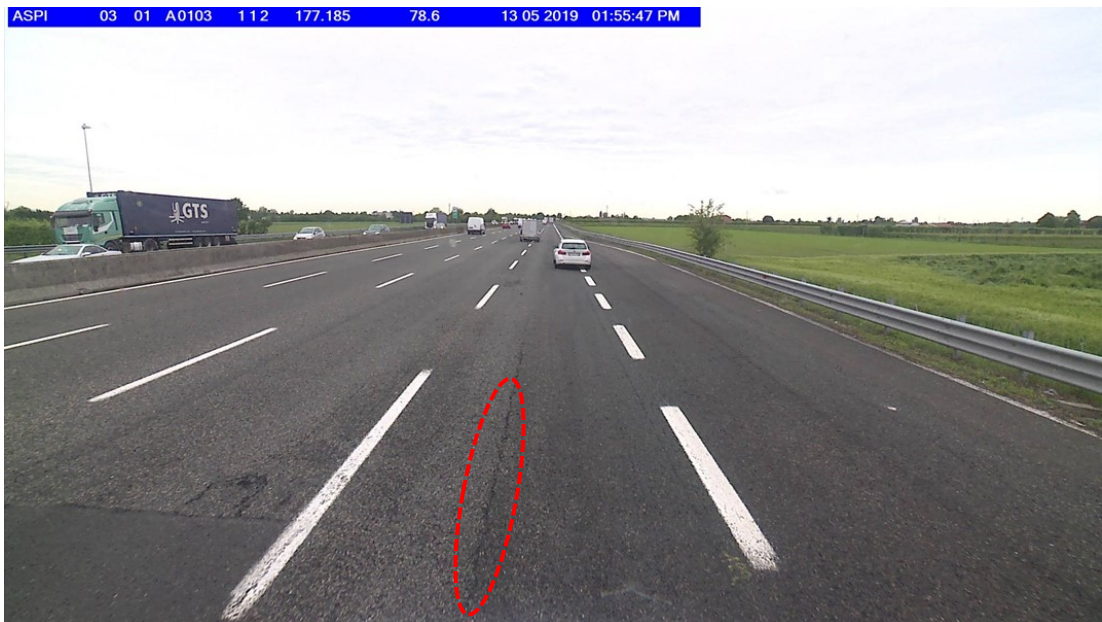


Figura 3.13 a: giunto di stesa della pavimentazione (in prossimità di una corsia di immissione)





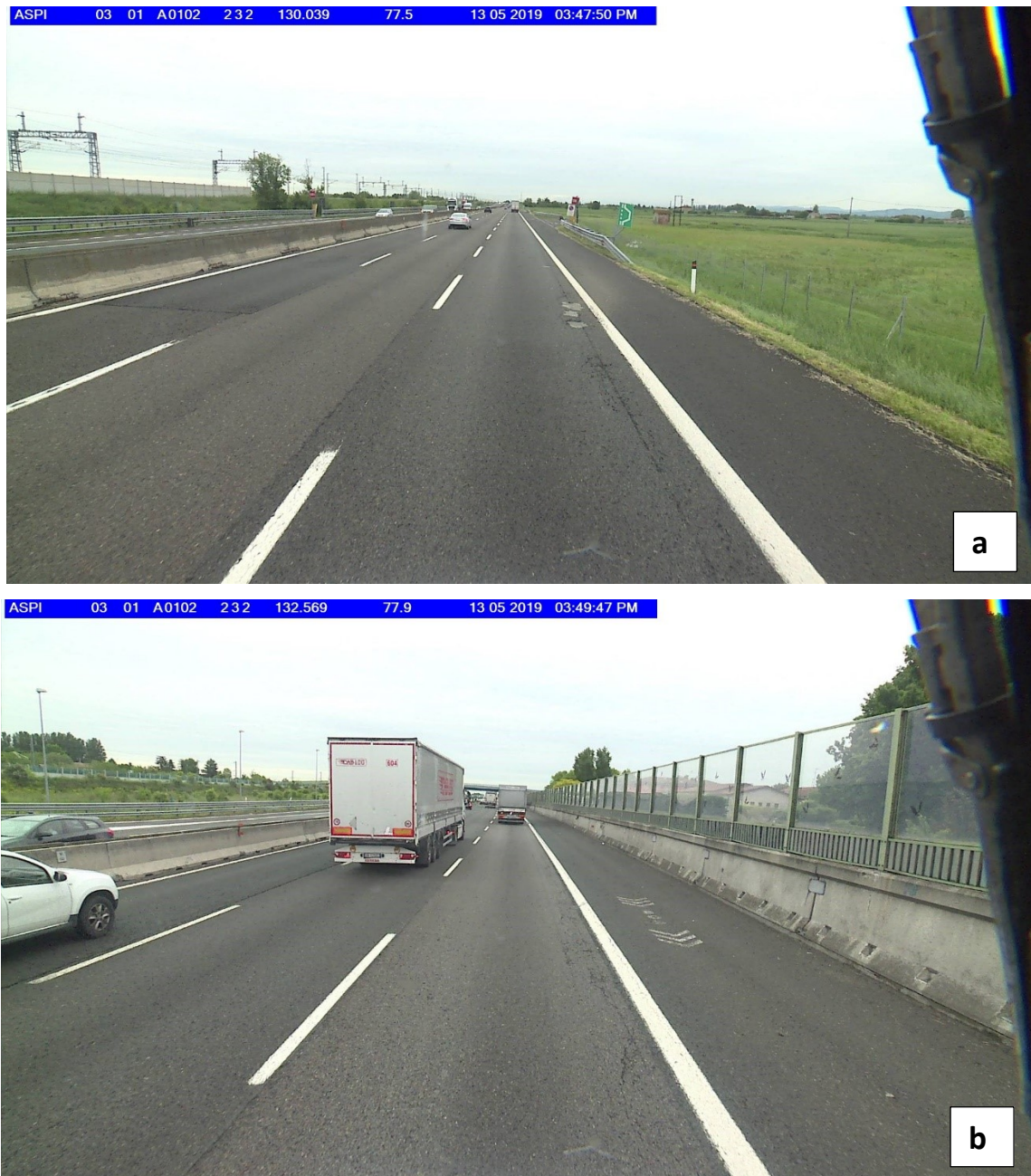
Figura 3.13 b: giunto di stesa della pavimentazione (stesa della corsia di emergenza)



Figura 3.14 : fessura dovuta a foratura dello pneumatico (incisione)

A differenza della fessurazione da top-down o di un giunto di stesa, una fessura causata dalla foratura dello pneumatico di un mezzo pesante non costituisce un vero e proprio dissesto della pavimentazione (si tratta unicamente di una incisione superficiale che generalmente non va ad inficiare le prestazioni del multistrato legato), tuttavia non è raro il caso in cui per la presenza molteplice, sulla stessa chilometrica, di una serie di fessure dovute a foratura si avvino fenomeni di sgranamento dello strato superficiale di usura oppure si favorisca l'innesco di un meccanismo secondario di top-down cracking (per via di punti di debolezza

della superficie stradale dove si hanno picchi di tensione a seguito del passaggio veicolare) (figura 3.15 a-b).



**Figura 3.15 a-b:** presenza di fessura dovuta ad una foratura che ha innescato altre tipologie di dissesto superficiale (sgranamento e top-down cracking)

### 3.2 Analisi sperimentale del top-down cracking

Nonostante fessure da top-down siano state rilevate solo in due campioni prelevati in sito, nei paragrafi successivi verranno presentate diverse procedure sperimentali eseguite su tutti i provini relativi allo strato di usura nella porzione di pavimentazione non ammalorata, per evidenziare l'eventuale variabilità delle proprietà delle miscele, utilizzate per lo strato drenante in ambito autostradale. L'indagine è finalizzata a suggerire una metodologia di analisi sperimentale valida per la caratterizzazione delle prestazioni del conglomerato oggetto di esame nei riguardi del top-down cracking, valutando i diversi parametri associati alla miscela che ne influenzano la resistenza a fessurazione superficiale.

Nel dettaglio, si è proceduto nel modo seguente:

- elaborazione preliminare per lo sviluppo di una legge di propagazione del top-down cracking in sito;
- analisi dei vuoti delle miscele drenanti prelevate;
- determinazione della rigidità dei provini relativi allo strato di usura;
- determinazione della resistenza a trazione dei provini prelevati in sito;
- determinazione di un indice di caratterizzazione sperimentale per il TDC (CTindex).

#### *Legge di propagazione del top-down cracking*

Utilizzando i dati di traffico presentati nel capitolo precedente in merito alla descrizione del programma sperimentale, e in particolare i valori di TGM rilevati per categorie di pedaggio da Autostrade in corrispondenza del tratto autostradale (tra due caselli) esaminato, e gli spettri di traffico, elaborati all'interno del medesimo programma di aggiornamento del PMS autostradale, è stato possibile associare ai provini in cui si è rilevata la presenza di una fessura da top-down, il numero di passaggi degli assi transitati, dal periodo di stesa del conglomerato esaminato fino alla data del carotaggio (tabella 3.1 a-b-c). Tale analisi dei risultati è da intendere esclusivamente come una esemplificazione preliminare di una metodologia proposta e applicabile in studi prossimi, finalizzati alla valutazione della propagazione del top-down cracking sulla rete autostradale, grazie al possesso di una più ampia serie di dati su carote affette da top-down. Nel dettaglio, è possibile studiare l'evoluzione della fessurazione da top-down ricercando una correlazione analitica tra il valore di profondità della fessurazione e il numero di passaggi di assi transitati: ci si aspetta

infatti che all'aumentare dei passaggi sulla pavimentazione la profondità di sviluppo della cricca tende ad aumentare, tramite una legge che può essere definita in maniera matematica. Nello studio in esame, avendo a disposizione solo due punti nei quali di fatto è stata riscontrata a posteriori, nella fase di analisi visiva delle carote prelevate, una fessura da top-down che si sviluppa in profondità nel conglomerato, si propongono grafici al solo scopo esemplificativo (figura 3.16 a-b). Un'indagine più dettagliata in tal senso può portare alla definizione di una legge e alla valutazione in merito a quali tipologie di assi causano la propagazione del dissesto, in maniera più determinante. Infatti oltre a delineare una relazione della profondità della fessura con il numero totale di assi transitati, può farsi riferimento al numero di passaggi di ogni singola tipologia di asse, determinabile attraverso lo spettro di traffico adottato, o addirittura considerando una somma pesata dei vari tipi (ci si aspetta verosimilmente che la tipologia più determinante per lo sviluppo e la progressione della fessura da top-down siano gli assi dotati di ruote singole radiali, montate in prevalenza su veicoli a 5 assi):

$$\sum_i^{10} \alpha_i \cdot (N_i)^{\beta_i}$$

dove:

- $\alpha_i$  rappresenta il peso nella sommatoria della i-esima tipologia di asse;
- $N_i$  è il numero di passaggi dell'asse i-esimo (caratterizzato da un certo carico e da una certa configurazione, sono state considerate 10 tipologie di assi di carico);
- $\beta_i$  è l'esponente dell'asse i-esimo (supposto che la legge di correlazione sia di tipo esponenziale).

Rimane aperta la questione sulla possibilità di determinare una legge analitica in grado di associare, con una certa accuratezza, il numero dei passaggi degli assi veicolari allo sviluppo della fessurazione da top-down in profondità oppure se sia necessario, per una corretta valutazione della propagazione del top-down cracking, considerare oltre ai carichi veicolari, altri parametri, come diverse proprietà della miscela ugualmente determinanti per lo sviluppo della fessurazione superficiale (tenore di vuoti, contenuto di bitume, contenuto di conglomerato riciclato, assortimento granulometrico, invecchiamento della miscela).

n.	Autostrada	Carr.	n. corsie	progr.	TIPOLOGIA	TRATTO	TGM per carreggiata e classe di traffico					TGM
							A	B	3	4	5	
7	A1	Sud	3	156+500	DRENANTE 2011	ALL. A1-A22 - MODENA NORD	352,106	45,571	9,607	6,884	68,485	482,653
15	A14	Sud	3	67+600	DRENANTE 2009	FAENZA - FORLÌ	299,672	35,275	7,673	3,742	41,679	388,042

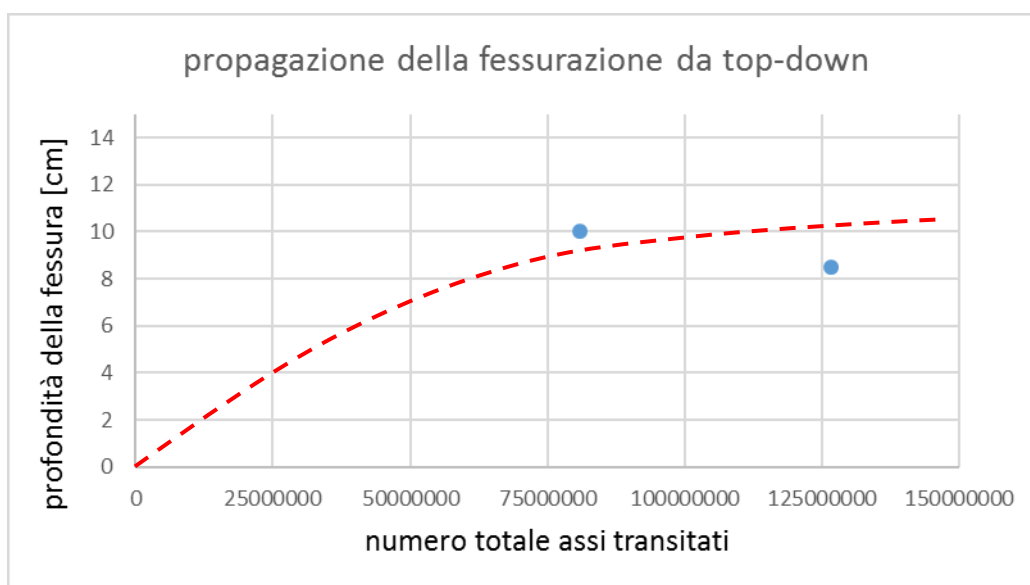
**Tabella 3.1 a:** traffico medio giornaliero per carreggiata e classe di pedaggio

n.	Veicoli	Autocarri	Autobus	Autocarri	Autotreni	Autoarticolato	Autocarri	Autotreni	Autoarticolato	Autotreno	Autoarticolato	TOT	TOT	TOT	TOT
	2 assi <18 t	2 assi 18 t	2 assi 19 t	3 assi 25 t	3 assi 24 t	3 assi 30 t	4 assi 32 t	4 assi 40 t	4 assi 40 t	5 + assi 44 t	5 assi 44 t	2 assi	3 assi	4 assi	5 assi
7	1998115	1713296	48200	2947156	75140	116884	100502	1144178	765362	2296395	18421566	3759612	3139180	2010042	20717960
15	1999481	704623	36604	2291504	11573	69440	80346	654244	413207	1886338	11387894	2740708	2372516	1147797	13274232

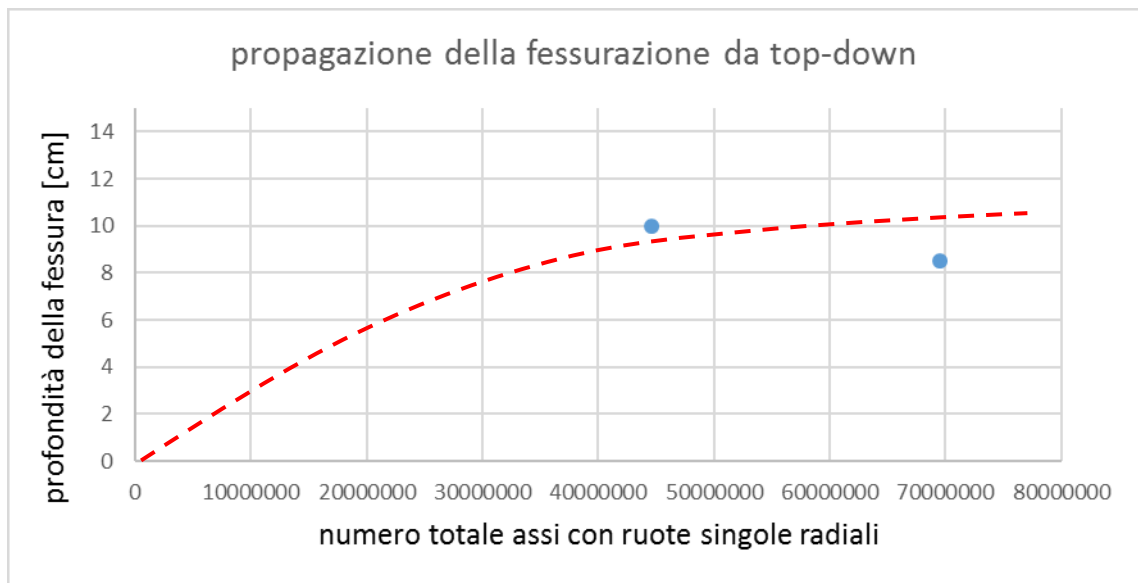
**Tabella 3.1 b:** numero di passaggi veicolari divisi per categoria di veicolo, in base allo spettro di traffico adottato

n.	Asse Anteriore	Asse Trainato	Asse Anteriore	Asse Motore	Asse Trainato	Asse Motore	Asse motore	Asse trainato	Asse Trainato	Asse Motore
	ruote singole 6 t	ruote gemellate 6 t	ruote singole 7 t	singolo radiale 8 t	singolo radiale 9 t	gemellate 10 t	gemellate 11 t	gemellate 11 t	gemellate 12 t	gemellate 12 t
7	26940742	53599	637793	4698880	64825483	77421	19587599	1762824		7996892
15	17190623	9215	368351	3944107	40694341	64506	12016626	1050533		5533133

**Tabella 3.1 c:** numero di transiti divisi per tipologia di asse, in base allo spettro di traffico adottato



**Figura 3.16 a:** esemplificazione della legge di propagazione del top-down cracking (in riferimento al numero totale di assi transitati)



**Figura 3.16 b:** esemplificazione della legge di propagazione del top-down cracking (in riferimento al numero di assi con ruote singole radiali, che verosimilmente determinano in misura maggiore lo sviluppo della fessurazione superficiale esaminata)

#### *Percentuale dei vuoti sulle miscele drenanti autostradali*

Tramite il metodo geometrico, calcolando il rapporto tra volume del cilindro a cui è associato il provino e massa del campione, si è proceduto ad una determinazione sommaria della percentuale di vuoti contenuti nelle miscele prelevate in sito, riferite alle porzioni di usura non ammalorate dalla fessurazione superficiale. Nonostante il procedimento non offre un risultato accurato (si è ipotizzata una quantità di legante fissa al 5% e non si è proceduto ad una estrazione del bitume), è evidente una marcata variabilità tra i provini testati. Sebbene tutte siano miscele drenanti, in alcuni campioni la percentuale di vuoti supera il 25% mentre in altri si attesta su valori minori del 15%. È chiaro come, per uno studio sulla fessurazione da top-down sulla rete, bisogna tenere in conto di tale variabilità poiché le miscele drenanti in sito sono caratterizzate da un tenore dei vuoti notevolmente differente, il quale determina caratteristiche prestazioni nei riguardi della fessurazione superficiale sicuramente diverse. Di seguito si riportano i risultati della percentuale dei vuoti calcolati nei provini di usura prelevati in sito (tabella 3.2, figura 3.17).

Anche visivamente è evidente la variazione del contenuto dei vuoti tra due diversi provini (nella foto (figura 3.18) vengono riportati il provino 10 (13% vuoti) e il provino 17 (24% vuoti)).

PROVINO	VOLUME [cm <sup>3</sup> ]	MASSA [g]	MASSA VOLUMICA [g/cm <sup>3</sup> ]	VUOTI [%]
1B	159.18	295.6	1.857	23
2B	235.47	494.7	2.101	12
3B	155.33	313.7	2.020	16
4B	288.41	579.8	2.010	16
5B	274.16	527.5	1.924	20
6B (*)				
7B	682.17	1280.6	1.877	22
8B	366.83	683.8	1.864	22
9B	371.59	765.2	2.059	14
10B	309.03	646.1	2.091	13
11B	320.58	649.8	2.027	16
12B	240.41	464.8	1.933	19
13B	292.33	549.7	1.880	22
14B	309.08	607.3	1.965	18
15B	284.91	510.8	1.793	25
16B (**)				
17B	291.24	533.9	1.833	24
18B	256.58	454.6	1.772	26
19B	274.79	498.6	1.814	24
20B	365.54	706.8	1.934	19
21B	447.67	832.8	1.860	22

\* provino non prelevato ( solo campioni relativi alla zona fessurata)  
 \*\* provino danneggiato in fase di carotaggio

Tabella 3.2: calcolo del tenore dei vuoti dei campioni prelevati in sito

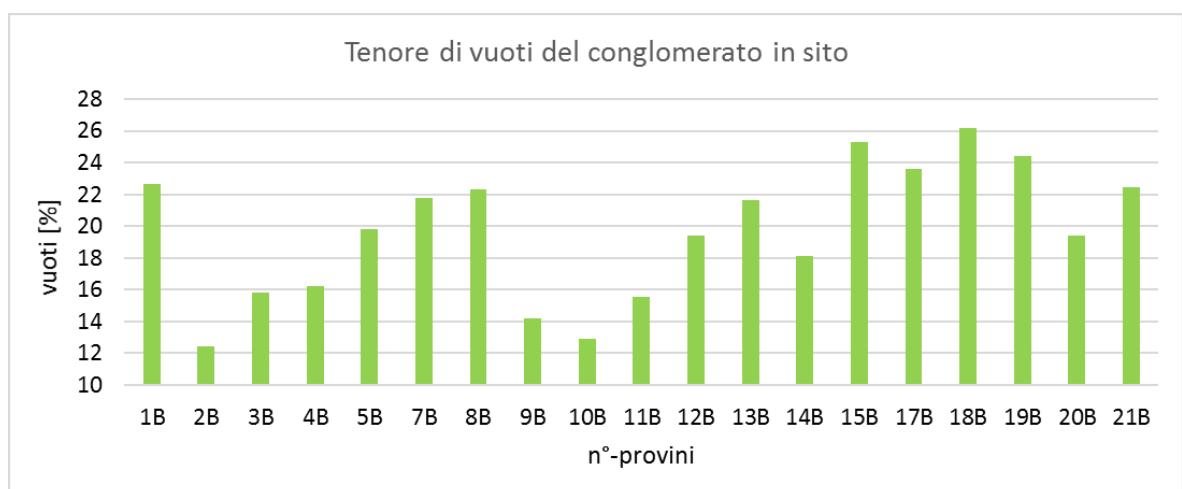


Figura 3.17: tenore dei vuoti dei campioni prelevati in sito



Figura 3.18: provini di drenante caratterizzati da percentuale dei vuoti molto differente

### *Modulo di rigidezza*

Come già ampiamente trattato nel capitolo precedente, nella parte relativa alla descrizione delle apparecchiature di prova, il test per la determinazione del modulo di rigidezza attraverso l'apparecchiatura NAT consiste nell'applicazione dinamica di un carico lungo il diametro verticale del provino cilindrico e nella misurazione della deformazione lungo il piano diametrale ortogonale.

Si riportano in forma grafica i dati ottenuti seguendo le modalità sopra descritte (figura 3.19, figura 3.20).



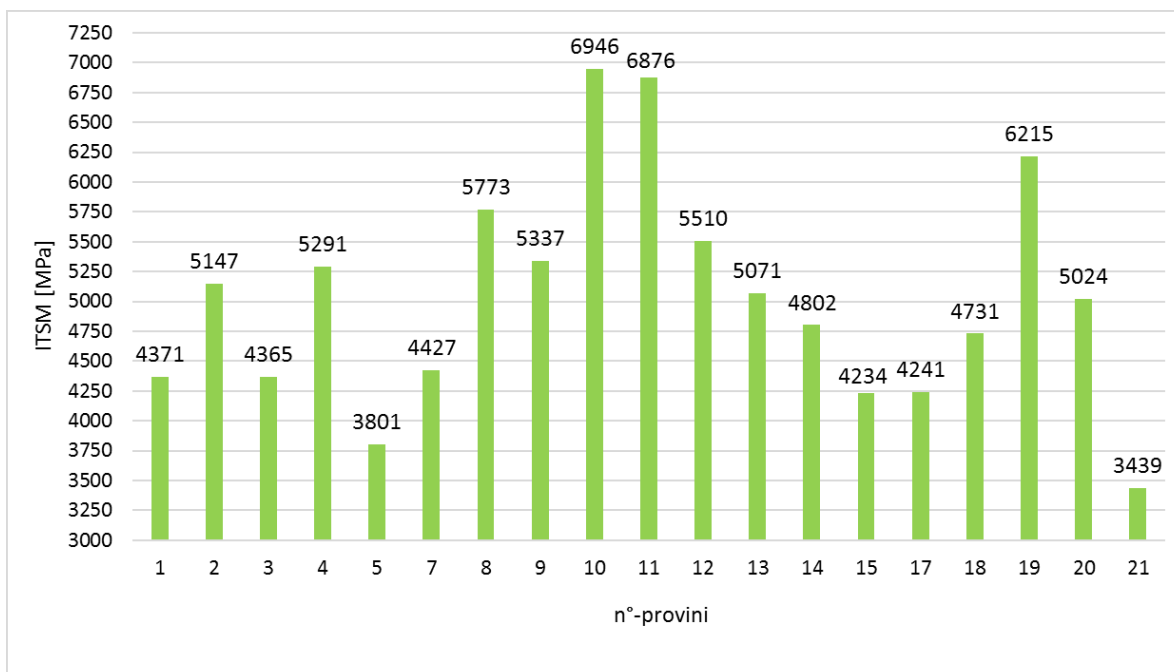


Figura 3.19: modulo di rigidezza ottenuto con il NAT

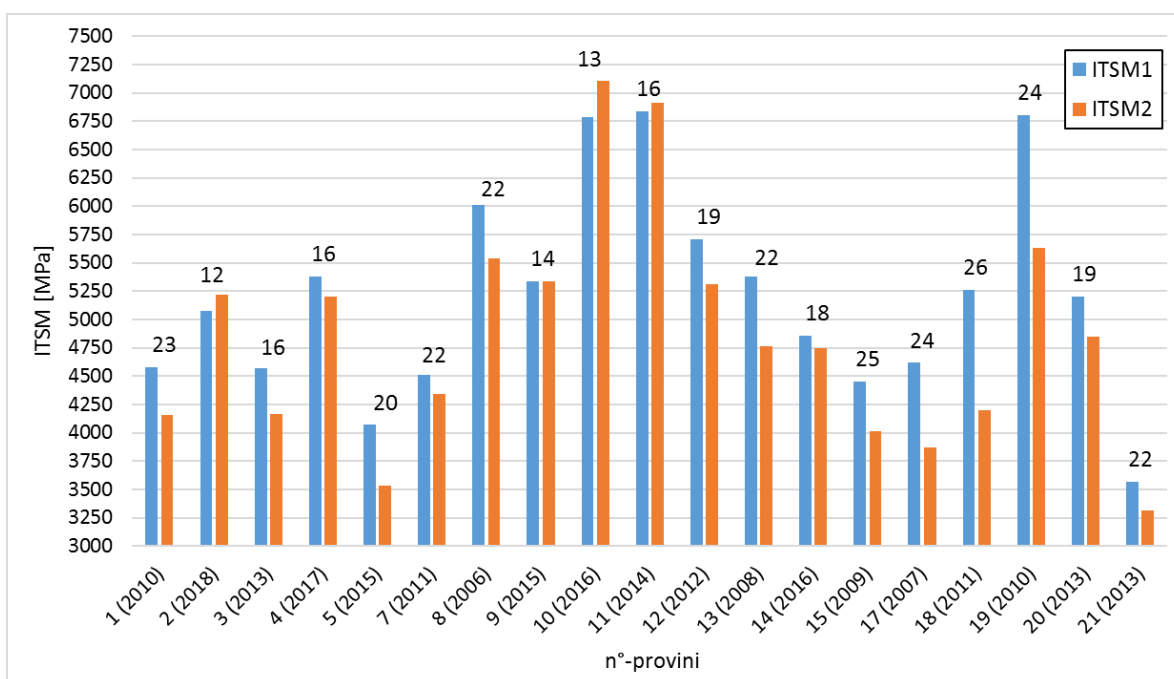
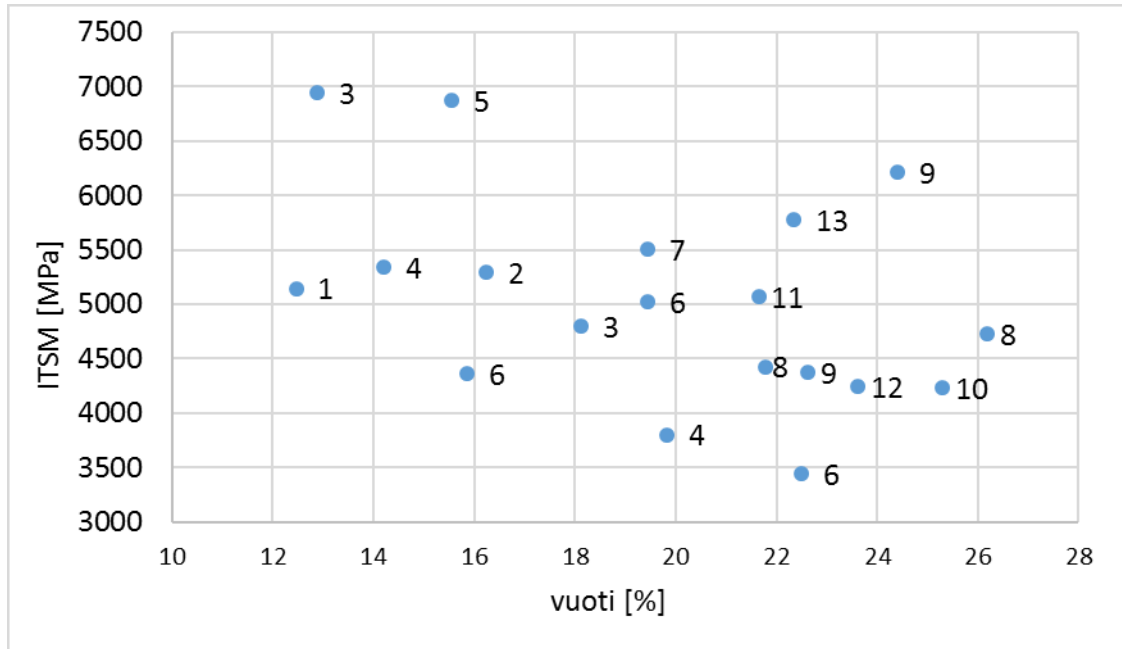


Figura 3.20: modulo di rigidezza ottenuto con il NAT nelle due direzioni diametrali testate (per ogni provino è indicato l'età della pavimentazione in basso e la percentuale di vuoti in alto sulla barra)

I valori del modulo di rigidezza misurati attraverso l'esecuzione della prova rientrano in un range ampio, per il fatto che i provini esaminati sono caratterizzati da proprietà della miscela diversi. Allo scopo di individuare una metodologia sperimentale utile per lo studio delle prestazioni del conglomerato nei riguardi del top-down cracking, si sono valutati in

particolar modo l'influenza del tenore dei vuoti e dell'invecchiamento della miscela sulla rigidità del conglomerato. Per una corretta valutazione del problema, come suggerisce la teoria, occorre sicuramente tenere simultaneamente in considerazione entrambi i parametri descritti: dai valori misurati si coglie infatti che in generale a parità di età della pavimentazione, il valore di modulo aumenta al diminuire della percentuale dei vuoti; al contrario il modulo di provini caratterizzati da una percentuale simile dei vuoti aumenta all'aumentare dell'età (poiché il conglomerato si irrigidisce a causa dei fenomeni di invecchiamento) (figura 3.21 a-b). Tuttavia, c'è da sottolineare come la correlazione appena descritta non sia netta e numerosi sono i casi in cui viene contrariata: da ciò si evince come sia necessario considerare altri parametri della miscela (come assortimento granulometrico, percentuale di bitume, quantità di RAP) al fine di pervenire ad una spiegazione esaustiva della variazione del modulo di rigidità, osservata nei diversi campioni esaminati. In aggiunta si riportano i grafici dell'andamento dei due valori di modulo misurati nelle due direzioni diametrali durante la prova, poiché si è visto che, data talvolta la notevole variazione tra i due valori, la media non sia pienamente rappresentativa (figura 3.22 a-b, figura 3.23 a-b).



**Figura 3.21 a:** modulo di rigidità al variare della percentuale di vuoti dei provini (per ogni punto misurato è indicata la corrispondente età della pavimentazione)

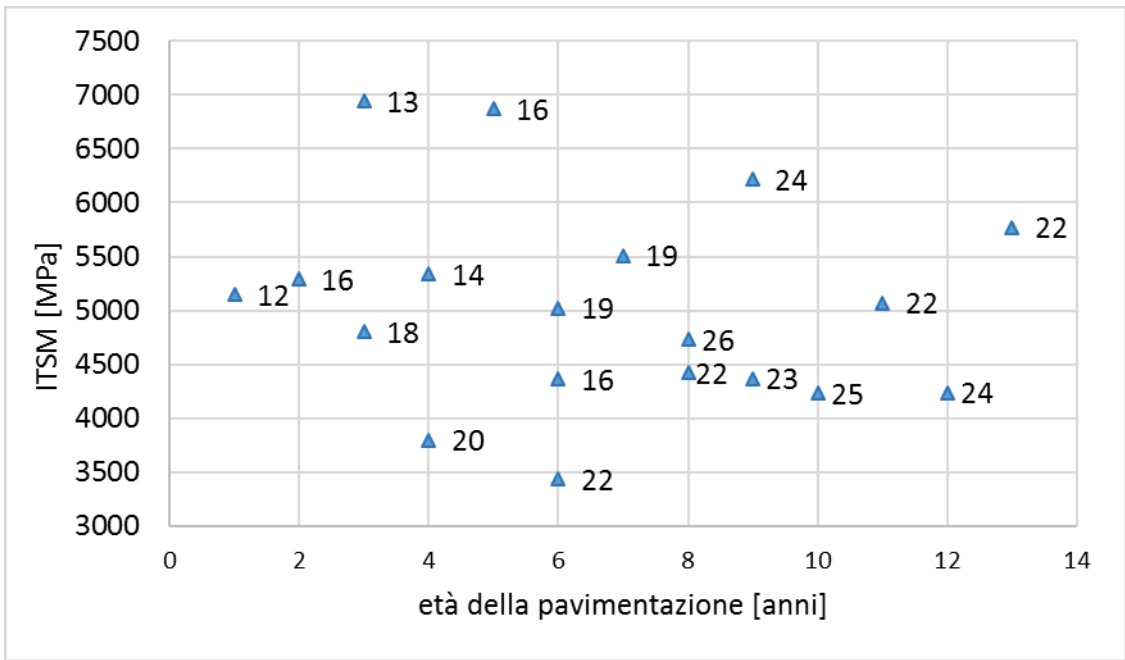


Figura 3.21 b: modulo di rigidezza al variare dell'invecchiamento dei provini (per ogni punto misurato è indicato il corrispondente valore dei vuoti)

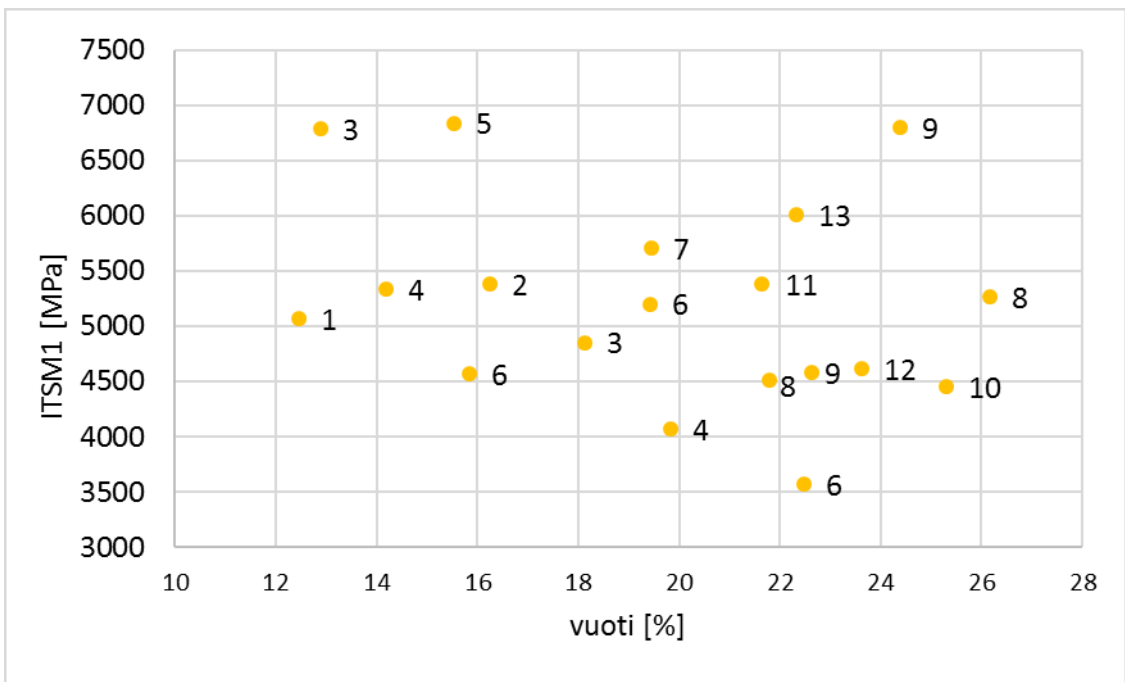


Figura 3.22 a: valore di ITSM1 al variare della percentuale di vuoti dei provini (per ogni punto misurato è indicata la corrispondente età della pavimentazione)

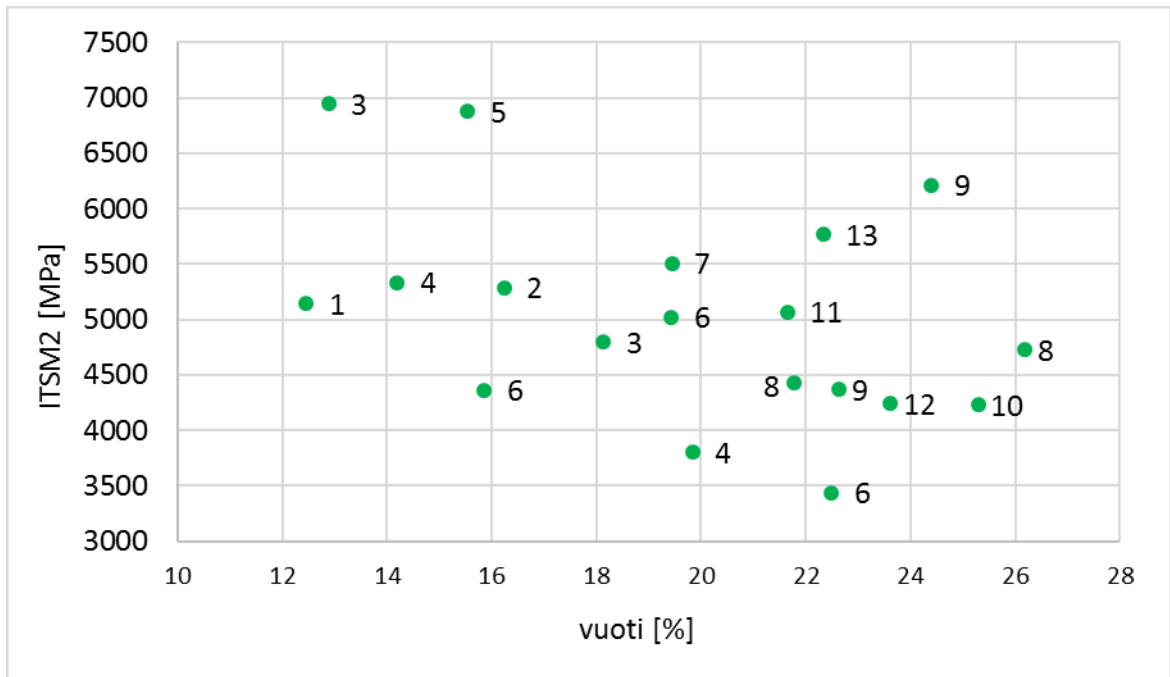


Figura 3.22 b: valore di ITSM2 al variare della percentuale di vuoti dei provini (per ogni punto misurato è indicata la corrispondente età della pavimentazione)

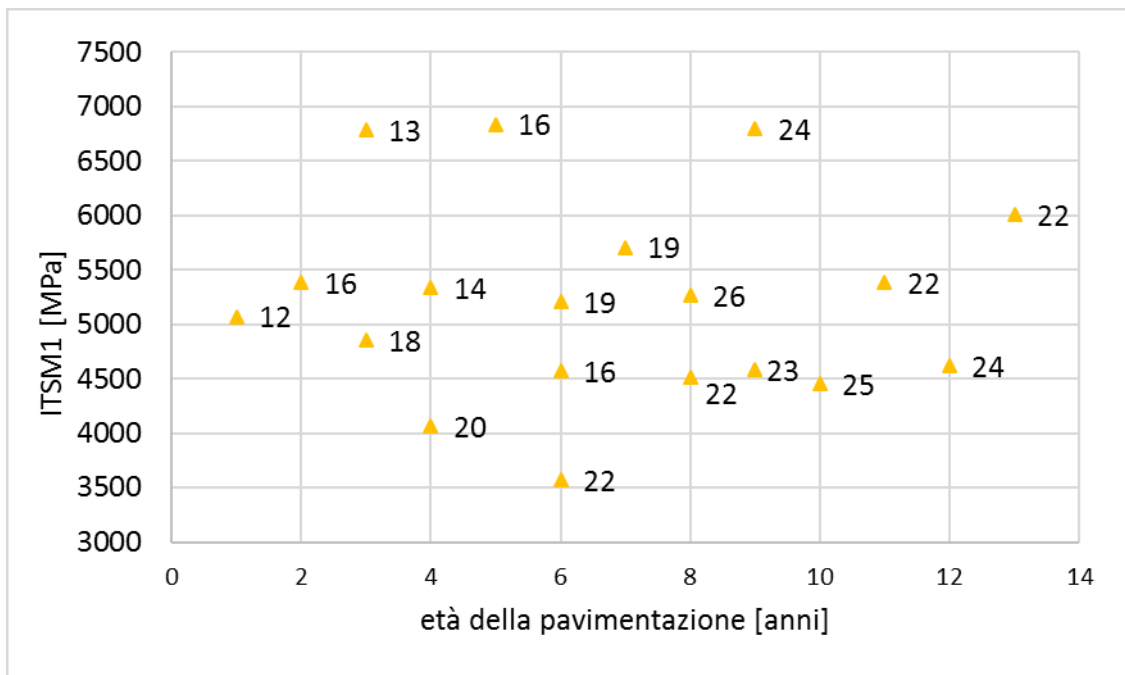


Figura 3.23 a: valore di ITSM1 al variare dell'invecchiamento dei provini (per ogni punto misurato è indicata la corrispondente percentuale di vuoti)

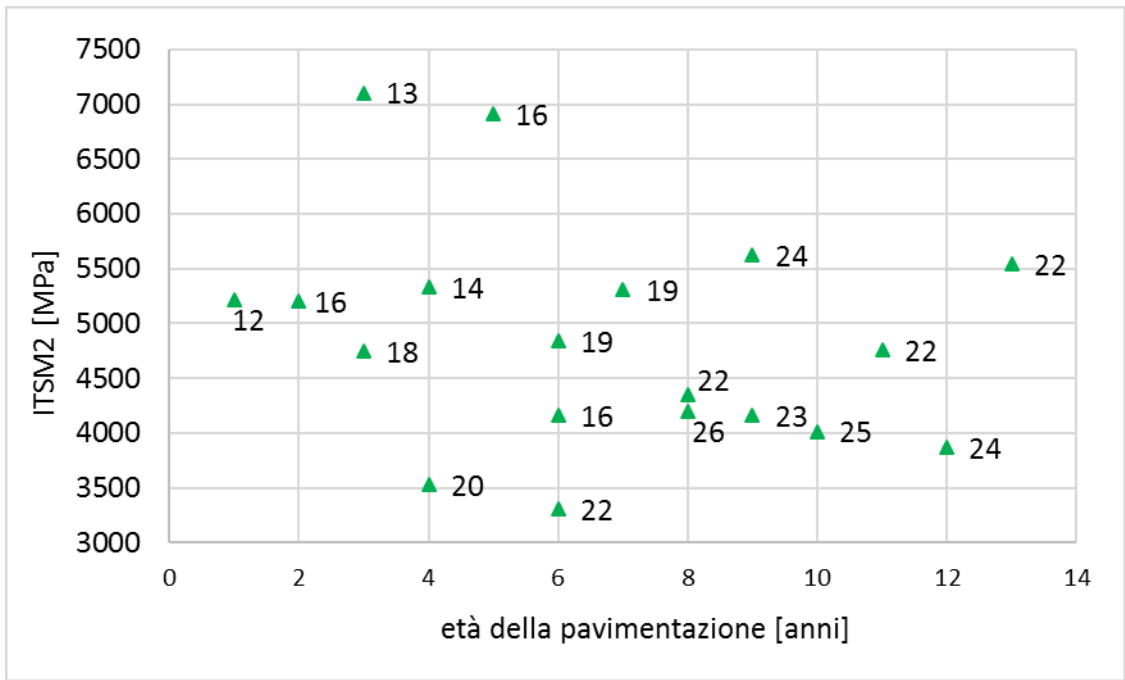


Figura 3.23 b: valore di ITSM2 al variare dell'invecchiamento dei provini (per ogni punto misurato è indicata la corrispondente percentuale di vuoti)

### *Resistenza a trazione indiretta*

La prova di trazione indiretta consiste nell'applicazione di un carico di compressione sul provino fino a raggiungere la rottura per trazione, nella direzione diametrale perpendicolare alla striscia di carico.

Dall'analisi dei grafici carico-spostamento, si nota come i risultati associati ai diversi provini testati presentino variazioni significative tra loro, sia in termini di carico massimo di picco (nel range 2 kN- 9kN), sia per quanto riguarda lo spostamento ultimo orizzontale e verticale, sia in riferimento alla forma generale della curva di carico, soprattutto nel caso dello spostamento verticale, dove si vede come alcuni provini manifestino una certa "duttilità" nella fase post-picco, mentre altri arrivano, in corrispondenza di un valore minimo di spostamento verticale, a rottura (figura 3.24, figura 3.25).

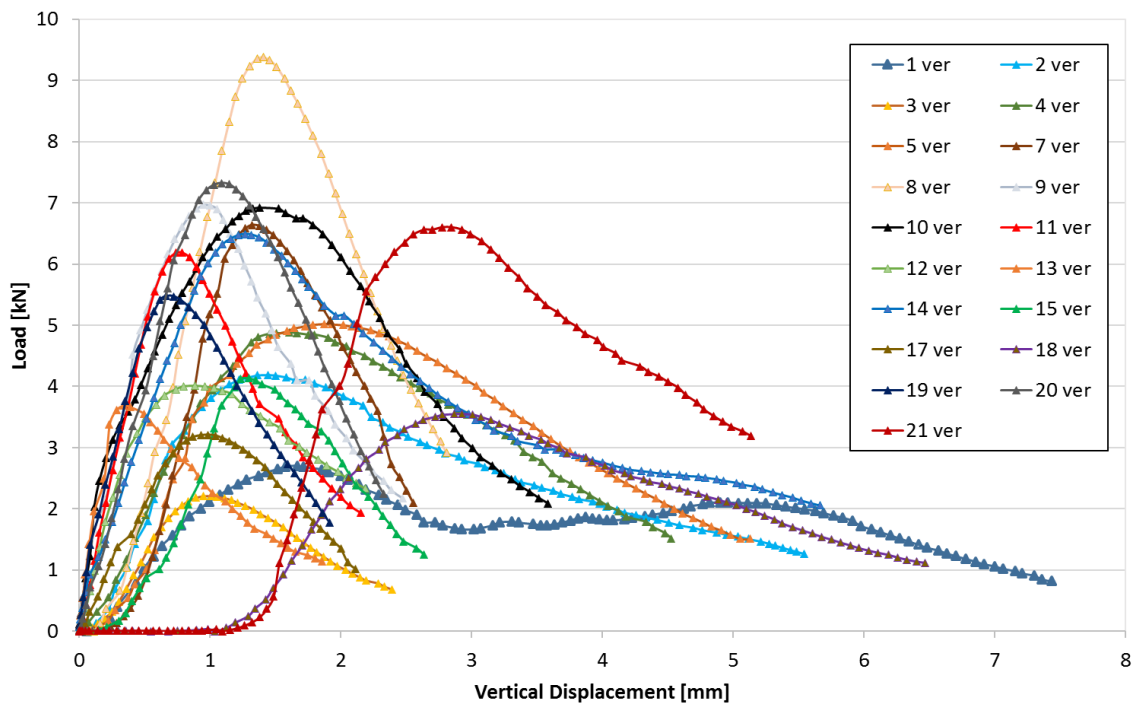


Figura 3.24: grafico deformazione verticale – carico applicato

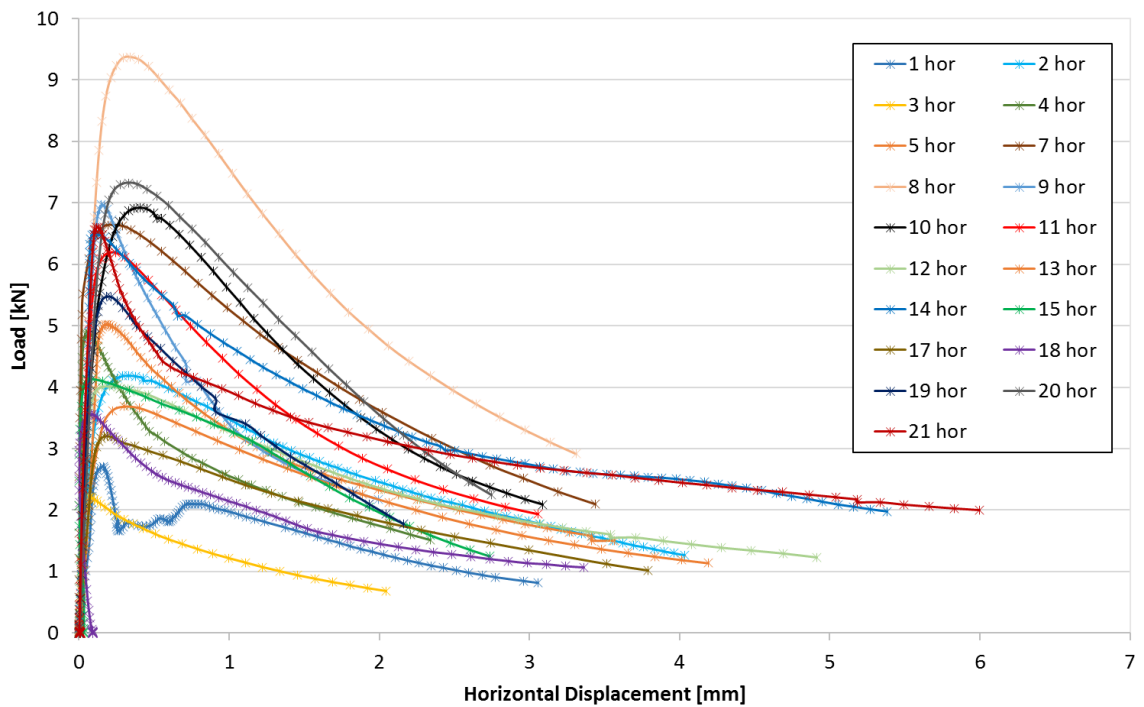
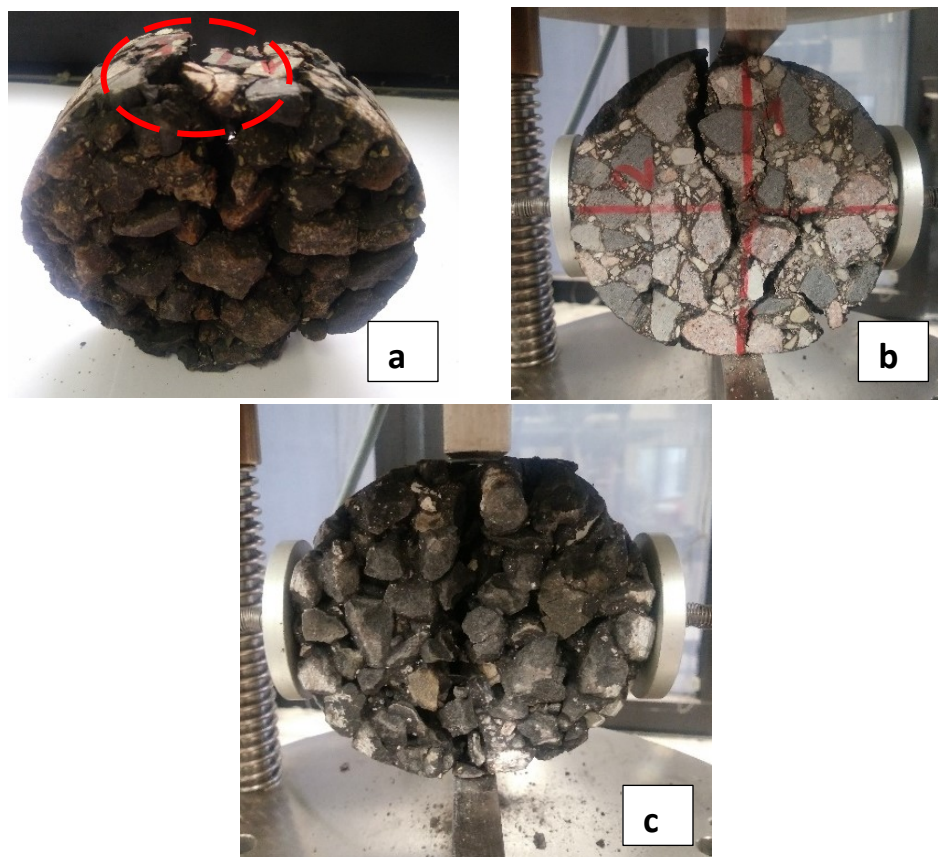


Figura 3.25: grafico deformazione orizzontale – carico applicato

Anche la tipologia di rottura, osservata visivamente durante l'esecuzione del test e mediante riprese di frames video, varia in base al campione testato; trattandosi di miscele porose non vi è in nessun caso una linea di rottura netta nella direzione diametrale verticale: alcuni provini sono arrivati a rottura per deformazione (cioè senza una linea di rottura per trazione chiaramente visibile, in special modo in prossimità delle teste di carico); altri non sono stati soggetti a deformazione al contatto con le teste di carico e sono arrivati a fine prova mediante un'unica linea di rottura (irregolare, che segue il bordo degli aggregati e i difetti, cioè i vuoti, del conglomerato). È chiaro come questo possa dipendere, verosimilmente, dalle diverse proprietà delle miscele analizzate: provini più soffici o con un alto tenore dei vuoti (cioè molto deformabili) manifestano in particolar modo deformazioni nette in prossimità delle teste di carico dell'apparecchiatura; provini più chiusi o più rigidi (perché derivanti da un conglomerato più invecchiato) mostrano un'unica linea di rottura, che diviene tanto più netta all'aumentare della massima pezzatura dell'aggregato utilizzato (figura 3.26).



**Figura 3.26:** varie tipologie di rottura riscontrate durante l'esecuzione del test: provino soggetto a notevole deformazione in prossimità delle teste di carico (a); assenza di deformazione ma presenza di una linea di rottura molto irregolare e talvolta multipla (b); linea di rottura netta (c)

Di seguito si riportano, in forma grafica, i risultati di ITS (Indirect Tensile Strength) e CTI (Indirect Tensile Coefficient), relativi ai diversi provini analizzati (figura 3.27, figura 3.28).

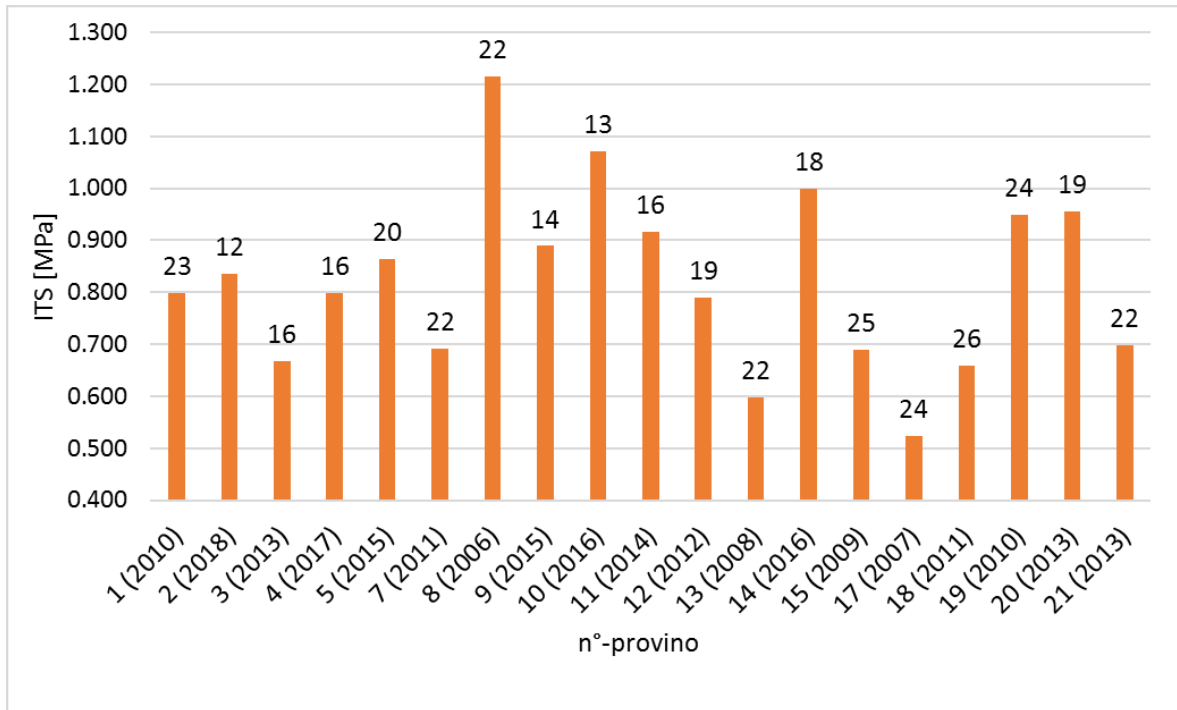


Figura 3.27: valore di ITS dei provini testati: per ciascun campione è indicato l'anno di stesa del conglomerato (in basso) e il tenore dei vuoti (in alto, sulla barra)

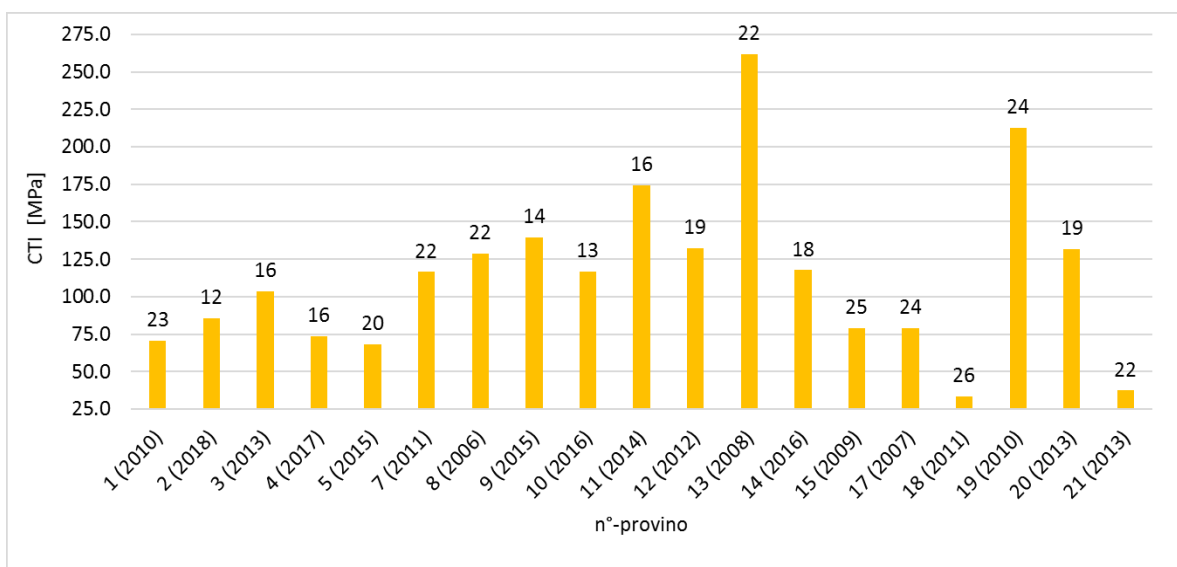


Figura 3.27: valore di CTI dei provini testati: per ciascun campione è indicato l'anno di stesa del conglomerato (in basso) e il tenore dei vuoti (in alto, sulla barra)



Alla stessa maniera dell'elaborazione dei risultati del modulo di rigidità, si è cercata l'esistenza di una correlazione, come suggerito dalla letteratura, tra il valore di resistenza a trazione indiretta e la percentuale dei vuoti e/o l'età del conglomerato allo scopo di individuare una metodologia valida applicabile nell'ambito di ricerche future sul top-down cracking e in grado di tenere in considerazione tutti i parametri determinanti il problema. Sebbene, come accadeva nel caso delle prove di modulo, un possibile trend dei risultati è davvero poco chiaro, in quanto vi sono numerosi punti in controtendenza, dall'osservazione dei risultati relativi a determinate serie di valori misurati si riesce a scorgere una certa correlazione: a parità di età del conglomerato, la resistenza a trazione del provino aumenta al diminuire della percentuale dei vuoti contenuti nella miscela; in parallelo, a parità dei vuoti nella miscela, la resistenza a trazione indiretta subisce un incremento all'aumentare dell'invecchiamento del conglomerato testato, ma in linea di massima si registra una diminuzione della duttilità (presumibilmente il conglomerato diviene più fragile a causa dei fenomeni di aging) (figura 3.28 a-b). Al fine di cercare una migliore correlazione tra i dati misurati, sono stati elaborati i medesimi grafici, sopra descritti per la resistenza a trazione, anche in riferimento al coefficiente di trazione indiretta (CTI), ma le osservazioni scaturite sono pressoché simili a quelle sopra esposte (figura 3.29 a-b).

Per una lettura esatta e completa dell'andamento dei risultati, così come suggerito dall'esito delle prove di modulo, verosimilmente è necessario considerare altri caratteri della miscela (contenuto di bitume, RAP, assortimento granulometrico) che risultano determinanti, seppure in maniera secondaria, oltre ai due parametri considerati nel presente studio (vuoti e invecchiamento), per la resistenza a trazione del conglomerato, nell'ambito di uno studio sulla valutazione del TDC in sito.

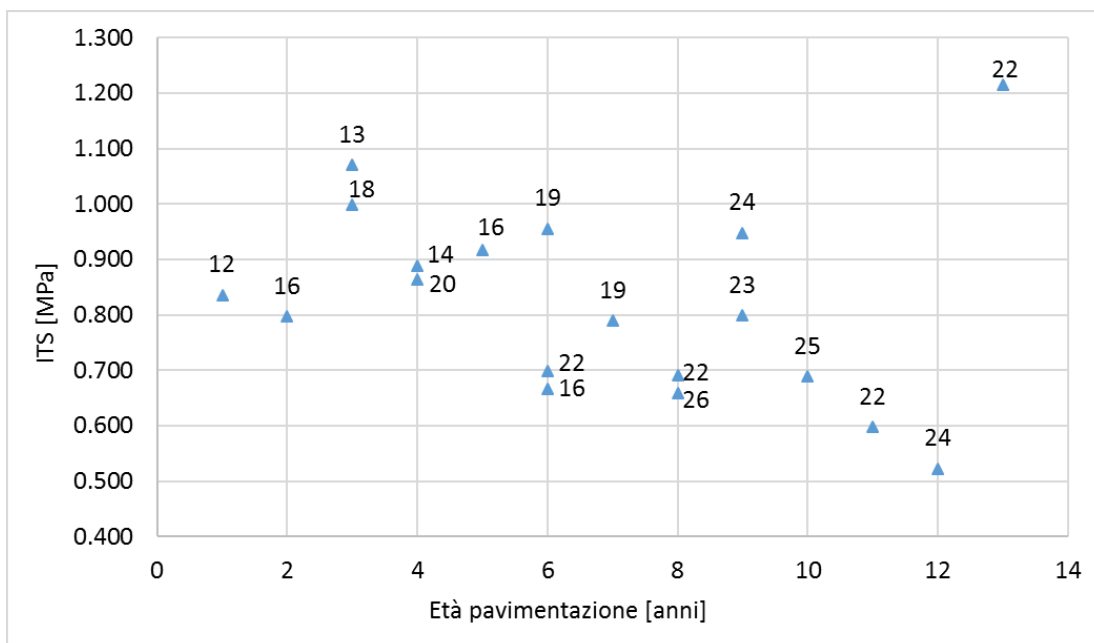


Figura 3.28 a: resistenza a trazione indiretta (ITS) al variare dell'età del conglomerato (per ciascun punto misurato vengono indicati i valori dei vuoti della miscela, in percentuale)

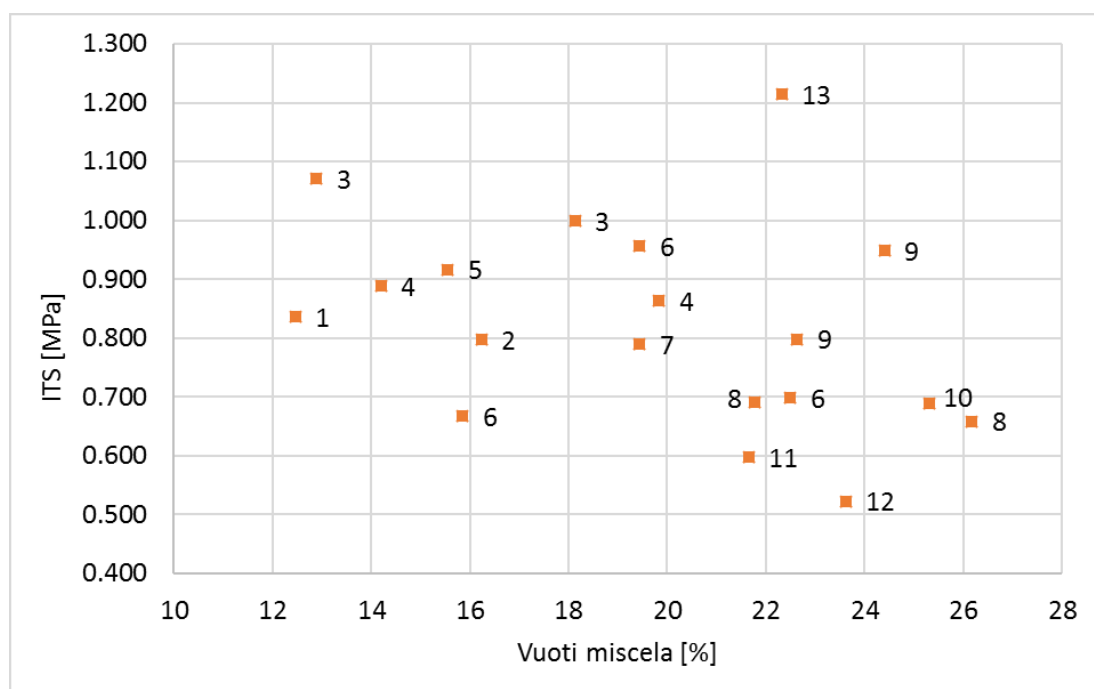


Figura 3.28 b: resistenza a trazione indiretta (ITS) al variare della percentuale dei vuoti della miscela (per ciascun punto misurato vengono indicati i valori di età del conglomerato, in anni)

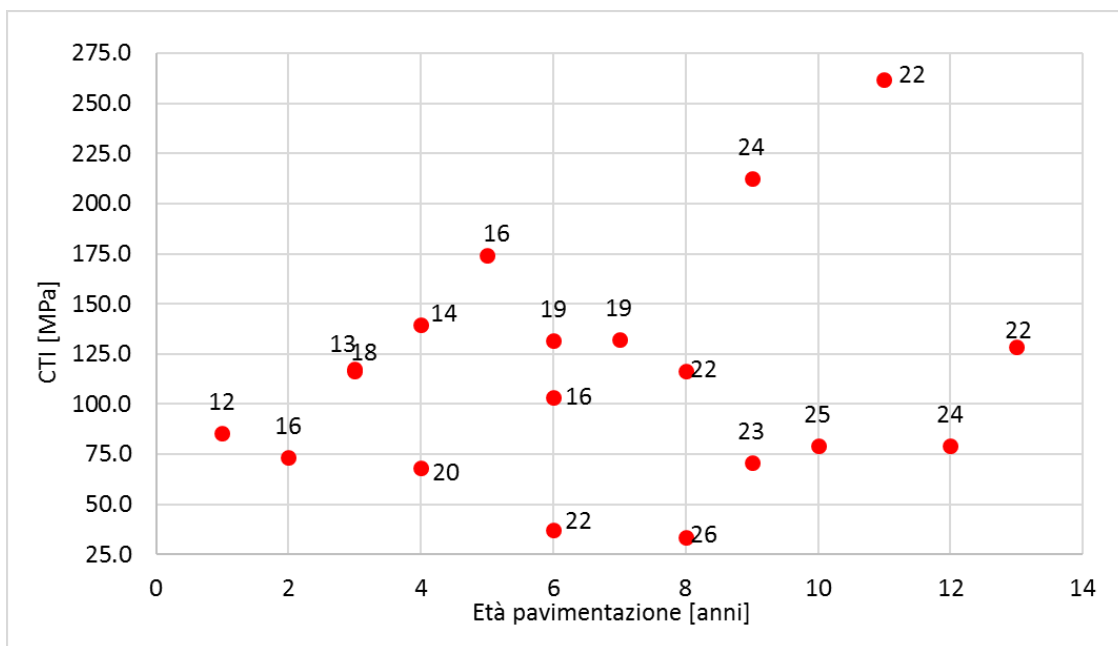


Figura 3.29 a: coefficiente di trazione indiretta (CTI) al variare dell'età del conglomerato (per ciascun punto misurato vengono indicati i valori dei vuoti della miscela, in percentuale)

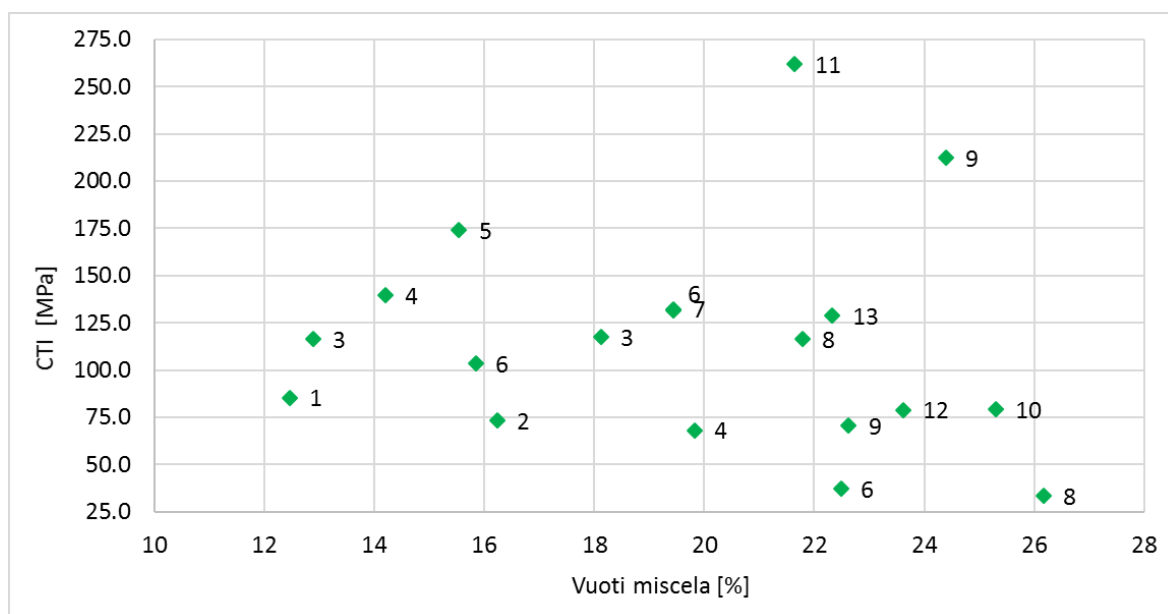


Figura 3.29 b: coefficiente di trazione indiretta (CTI) al variare della percentuale dei vuoti della miscela (per ciascun punto misurato vengono indicati i valori di età del conglomerato, in anni)

In ultimo si è valutata l'esistenza di una possibile correlazione lineare tra il modulo di rigidità calcolato con l'apparecchiatura NAT e il comportamento del provino a trazione indiretta (resistenza a trazione ITS e coefficiente di trazione indiretta CTI). Dai valori bassi

di  $R^2$  relativi ad entrambe le elaborazioni, si evince come tali correlazioni lineari proposte non siano ottimali (figura 3.30 a-b).

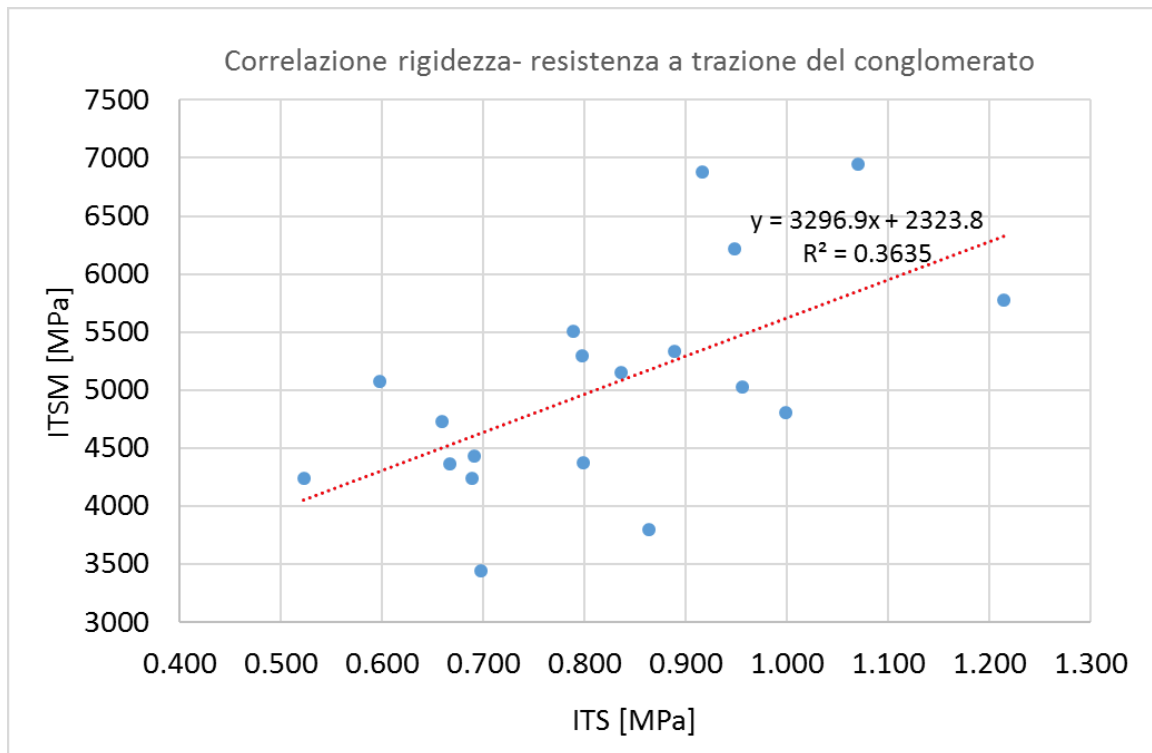


Figura 3.30 a: correlazione rigidezza-resistenza a trazione del conglomerato

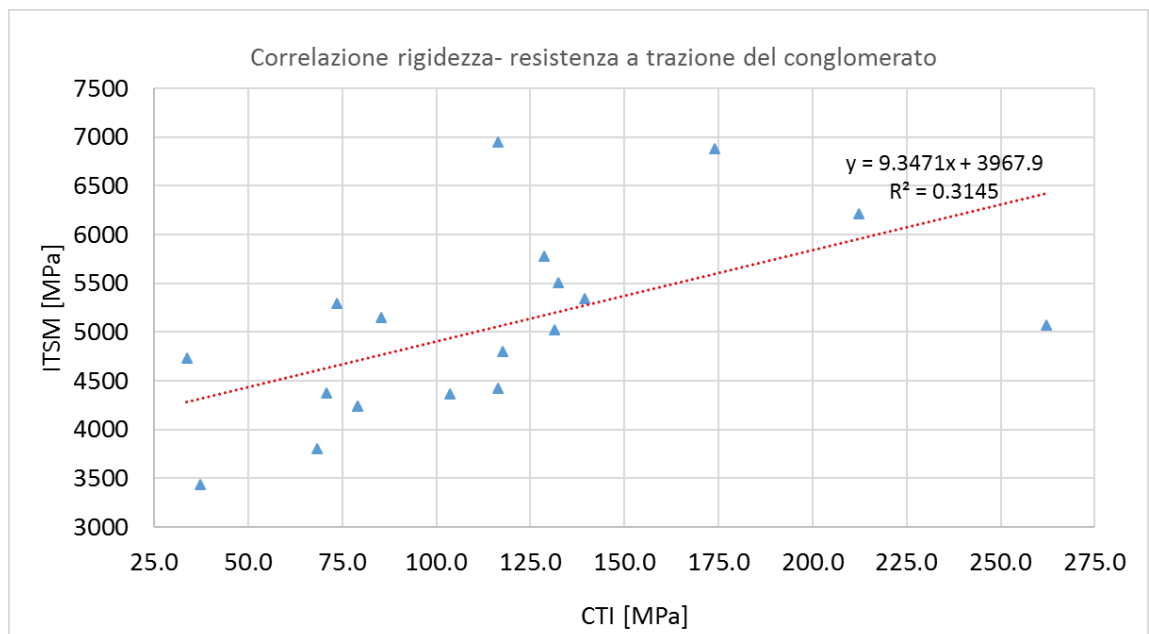


Figura 3.30 b: correlazione rigidezza-coefficiente di trazione indiretta del conglomerato

### Indice di caratterizzazione sperimentale del TDC

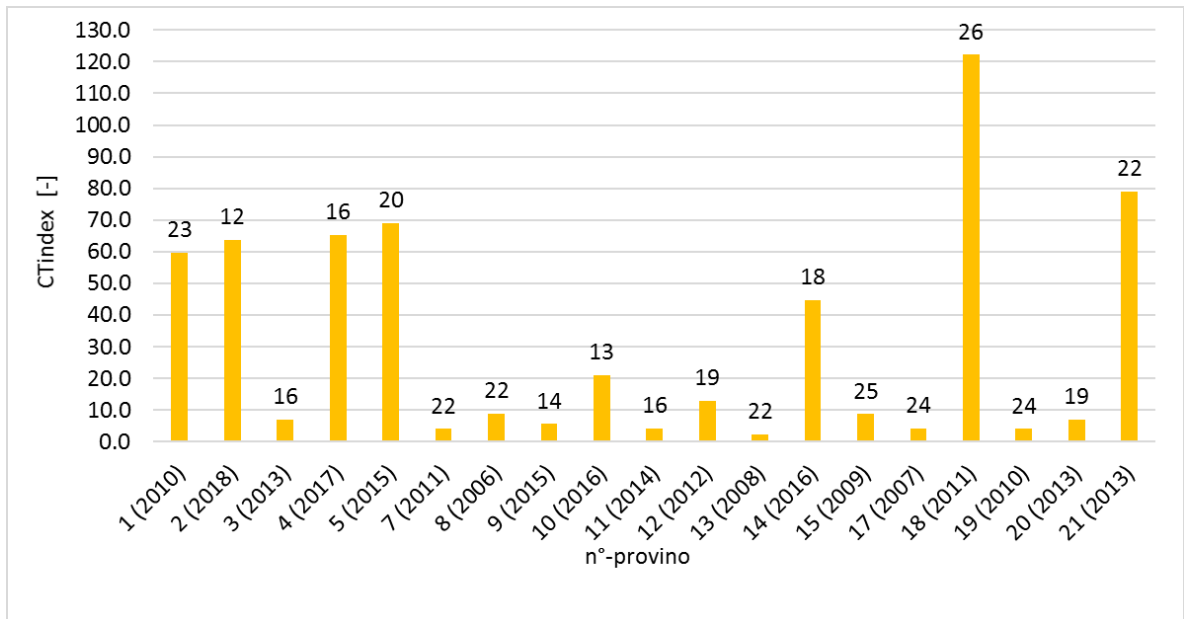
In ottica di un utilizzo futuro per lo studio del top-down cracking avendo a disposizione un maggior numero di dati, è stato calcolato un indice di caratterizzazione sperimentale della resistenza a fessurazione della miscela (denominato CTindex), in grado, in linea teorica, per mezzo di un singolo parametro, di descrivere le prestazioni nei riguardi della fessurazione superficiale del conglomerato, indagato per mezzo di una prova a trazione indiretta (per maggiori dettagli si rimanda al paragrafo 1.6 “Indici di caratterizzazione sperimentale della resistenza al top-down cracking”- “Indirect Tensile Asphalt Cracking Test”).

Un valore più elevato del CTindex equivale ad una resistenza a fessurazione superficiale della miscela indagata maggiore.

Di seguito si riportano i risultati, in forma tabellare e in forma grafica, dell’analisi condotta sui provini sottoposti al test (tabella 3.3, figura 3.31).

provino	H [mm]	D [mm]	vuoti [%]	età [anni]	Wf [J]	Gf [J/m <sup>2</sup> ]	P75 [KN]	P85 [KN]	P65 [KN]	I75 [mm]	I85 [mm]	I65 [mm]	m	CTindex
1	22.95	93.98	23	9	13.04	6044	2.03	2.30	1.76	2.49	2.21	2.75	0.99	59.6
2	33.91	94.03	12	1	14.08	4416	3.14	3.56	2.72	2.53	2.25	3.07	1.02	63.7
3	22.43	93.91	16	6	3.22	1530	1.66	1.88	1.43	1.60	1.42	1.74	1.36	6.9
4	41.26	94.33	16	2	14.40	3701	3.66	4.15	3.17	2.87	2.44	3.29	1.15	65.4
5	39.34	94.20	20	4	16.35	4412	3.77	4.27	3.27	3.20	2.83	3.56	1.38	69.1
7	43.08	142.00	22	8	9.43	1541	4.98	5.65	4.32	1.96	1.76	2.13	3.64	4.1
8	51.73	95.03	22	13	14.84	3018	7.03	7.97	6.09	1.99	1.82	2.14	5.86	9.0
9	52.58	94.86	14	4	10.80	2165	5.22	5.92	4.53	1.42	1.27	1.56	4.89	5.6
10	43.08	95.58	13	3	16.63	4039	5.19	5.89	4.50	2.30	2.08	2.51	3.20	21.1
11	45.28	94.95	16	5	8.08	1880	4.64	5.26	4.02	1.19	1.04	1.34	4.05	4.3
12	34.15	94.68	19	7	6.71	2075	3.01	3.41	2.61	1.70	1.45	1.96	1.58	13.0
13	41.35	94.88	22	11	4.23	1078	2.76	3.13	2.39	0.78	0.65	0.96	2.39	2.5
14	43.51	95.10	18	3	20.77	5020	4.87	5.52	4.22	2.16	1.79	2.52	1.79	44.8
15	40.24	94.95	25	10	5.83	1527	3.10	3.51	2.69	1.92	1.70	2.06	2.30	8.7
17	41.18	94.90	24	12	3.47	887	2.41	2.73	2.09	1.55	1.40	1.68	2.26	4.3
18	36.08	95.16	26	8	11.88	3461	2.66	3.02	2.31	4.09	3.63	4.63	0.71	122.2
19	38.63	95.18	24	9	6.96	1892	4.11	4.66	3.56	1.19	1.04	1.33	3.66	4.0
20	51.13	95.41	19	6	10.90	2234	5.49	6.23	4.76	1.66	1.49	1.81	4.63	6.9
21	63.63	94.65	22	6	17.44	2896	4.95	5.61	4.29	3.82	3.46	4.33	1.52	78.9

Tabella 3.3: tabella di calcolo dell’indice di resistenza a fessurazione



**Figura 3.31:** valori di indice di resistenza alla fessurazione; per ciascun provino vengono indicati età del conglomerato (in basso) e percentuale dei vuoti della miscela (in alto, sulla barra)

Nella medesima maniera dello studio dei valori della resistenza a trazione indiretta e di coefficiente di trazione indiretta, si sono valutate eventuali correlazioni tra indice di caratterizzazione sperimentale (CTindex) ed età del conglomerato e percentuale dei vuoti della miscela: nel grafico del CTindex in relazione all'età della pavimentazione si vede che all'aumentare dell'invecchiamento, indipendentemente dai vuoti, i valori di indice si attestano tutti su valori bassi, mentre non si riescono a trovare correlazioni, a parità di età del conglomerato, variando il tenore dei vuoti (ci si aspetterebbe un incremento dell'indice al diminuire dei vuoti della miscela). Al contrario, il secondo grafico, che mostra la relazione tra indice di resistenza a fessurazione e percentuale dei vuoti, mostra delle correlazioni più evidenti: a parità dei vuoti contenuti nella miscela, il CTindex calcolato aumenta in corrispondenza di provini di conglomerato più giovane (i fenomeni di aging infatti irrigidiscono e infragiliscono la miscela, rendendola più soggetta a fessurazione) (figura 3.32 a-b).

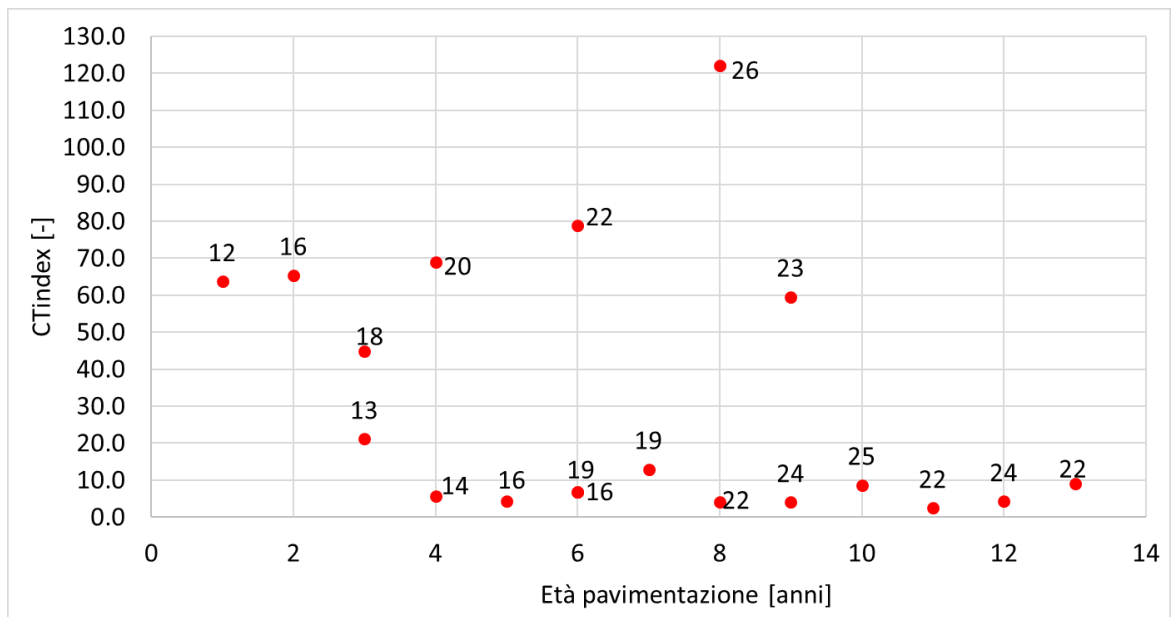


Figura 3.32 a: indice di resistenza a fessurazione (CTIndex) al variare dell'età del conglomerato (per ciascun punto misurato vengono indicati i valori dei vuoti della miscela, in percentuale)

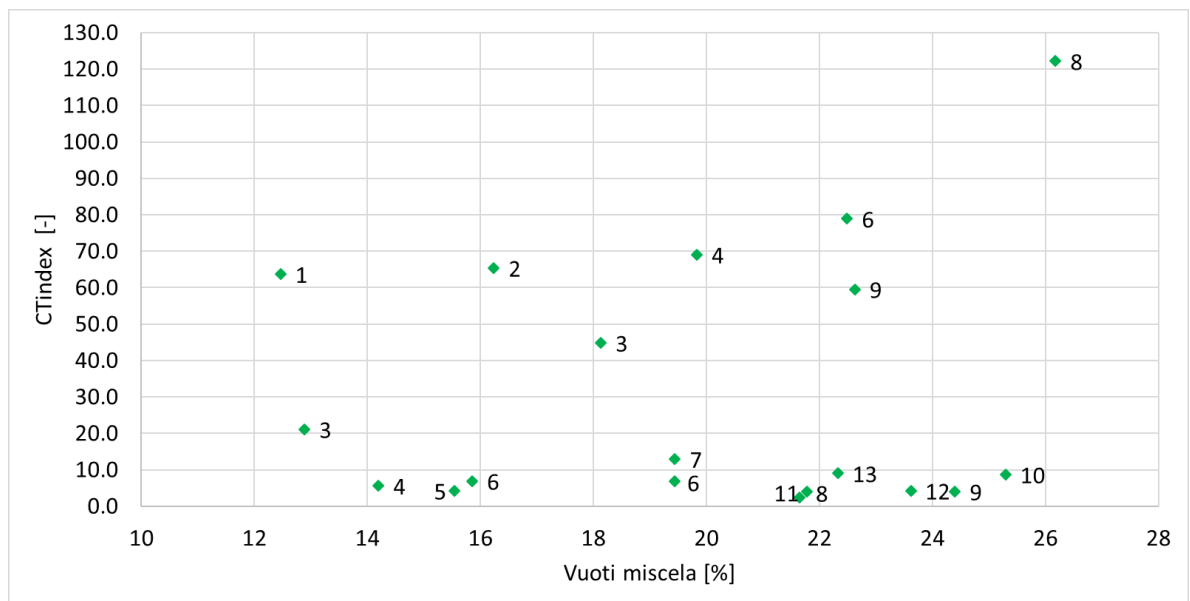


Figura 3.32 b: indice di resistenza a fessurazione (CTIndex) al variare della percentuale dei vuoti della miscela (per ciascun punto misurato vengono indicati i valori di età del conglomerato, in anni)

# Conclusioni

Il fenomeno del top-down cracking (in breve TDC) si manifesta generalmente con una serie di fessure superficiali che si sviluppano in direzione prevalentemente longitudinale, in prossimità del bordo della striscia di impronta dello pneumatico sulla pavimentazione. Tale tipologia di dissesto stradale viene riscontrata sempre più comunemente negli ultimi anni, a causa dell'avvento della logistica nel settore dei trasporti, che tende a privilegiare il trasporto in autostrada con veicoli maggiormente a 5 o più assi, dotati di ruote singole radiali, che a loro volta favoriscono l'instaurarsi di un importante regime di tensioni verticali e tangenziali al contatto pneumatico-pavimentazione. Il meccanismo di rottura, che innescandosi dalla superficie si propaga verso gli strati legati più profondi, viene accentuato in particolar modo in presenza di gradienti di rigidità all'interno del multistrato in conglomerato bituminoso, dovuti a variazioni termiche e/o fenomeni di aging, che determinano un irrigidimento e un infragilimento della miscela. In tal senso, il fenomeno è esasperato nel caso di pavimentazioni robuste ed utilizzo di miscele porose (a causa di fenomeni di invecchiamento più severi), situazioni ricorrenti in ambito autostradale.

Lo studio in esame rientra nell'ambito di un più ampio progetto di ricerca finalizzato all'aggiornamento del sistema di gestione delle pavimentazioni (PMS), richiesto dalla società concessionaria Autostrade per l'Italia S.p.A., e personalizzato in base alle criticità specifiche della rete autostradale, alla luce dell'evoluzione tecnica dei veicoli commerciali circolanti (le cui particolarità concorrono alla definizione delle sollecitazioni sulla pavimentazione) e delle caratteristiche dei nuovi materiali impiegati. Si è proceduto, in particolare, ad una valutazione preliminare del fenomeno del top-down cracking sulla rete autostradale, attraverso un rilievo visivo dei dissesti superficiali della pavimentazione all'interno di segmenti autostradali, selezionati appositamente come rete-pilota del progetto di ricerca, e attraverso un'analisi sperimentale in laboratorio di campioni prelevati in sito nei punti caratterizzati da fessurazione.

Dall'indagine sperimentale presentata, sono scaturite diverse osservazioni di interesse:

- la concentrazione della fessurazione da top-down riscontrata sulla rete-pilota, in corrispondenza della corsia di marcia destra, si attesta su valori importanti (20%), soprattutto nel tratto interessato dal livello maggiore di traffico pesante (A1 MILANO-NAPOLI), tale da non poter essere trascurata nell'ambito di un moderno piano di gestione e manutenzione autostradale;



- non sono rare situazioni in cui la fessurazione da top-down evolve in una vera e propria fessurazione “a ragnatela”, causando lo sfondamento della pavimentazione in prossimità della striscia di impronta dello pneumatico (caso di pavimentazioni vecchie e caratterizzate da elevati volumi di traffico, A1 MILANO-NAPOLI);
- all'interno del segmento autostradale caratterizzato da uno strato di usura chiuso (zona montana), al contrario, il dissesto da top-down cracking è praticamente assente, a testimonianza di come l'utilizzo di una miscela porosa (strato di usura drenante) costituisca un fattore determinante per l'innescò del danno;
- la fessurazione superficiale, causata dallo strisciamento del cerchione di un mezzo pesante a seguito della foratura di uno pneumatico, è caratterizzata da una concentrazione in sito importante, maggiore di quella relativa al TDC;
- al fine di un corretto rilievo dei dissesti superficiali, applicabile anche all'interno di un piano di gestione della pavimentazione, è utile considerare diversi criteri finalizzati all'individuazione e alla discriminazione delle diverse tipologie di fessurazione superficiale longitudinale, riscontrabili in sito. Schematicamente si possono distinguere fessure da top-down, fessure dovute ad una foratura e giunti di stesa del conglomerato: in particolare, sebbene si sviluppino tutte, su larga scala, in direzione longitudinale, una fessurazione da top-down è caratterizzata da una certa irregolarità di sviluppo in superficie su piccola scala, mentre una fessura causata da una foratura procede in maniera perfettamente regolare, apparendo come una incisione sulla superficie; i giunti di stesa appaiono invece come delle vere e proprie cricche (dotate di maggiore regolarità rispetto al TDC) e sono riconoscibili per la loro usuale localizzazione lontana dalla striscia di impronta dello pneumatico (verosimilmente linea di margine tra corsia di marcia destra e corsia di marcia centrale), e solo in casi sporadici si trovano in punti tali da poter generare un errato riconoscimento ( stesa di una corsia di emergenza ristretta o stesa nel caso dell'allargamento di carreggiata a seguito dell'inserimento della quarta corsia di marcia);
- all'interno di un valido programma sperimentale, finalizzato alla valutazione delle prestazioni del conglomerato in sito nei riguardi del top-down cracking, è necessario tenere in conto della profonda variabilità del tenore dei vuoti, riscontrata nei provini di drenante prelevati sulla rete autostradale (percentuale dei vuoti misurata nel range 12% - 26%);

- è possibile sviluppare, nell'ambito di indagini future, con l'ausilio di un maggior numero di dati, ricavati da carote prelevate in sito ed affette da fessurazione, una legge di propagazione del TDC sulla rete, già proposta in maniera esemplificativa all'interno di tale studio, ovvero una correlazione di natura analitica che lega profondità della fessura da top-down al numero di assi transitati durante la vita, elaborando una somma pesata per tener conto del diverso contributo nell'innescare e propagazione del dissesto superficiale delle varie tipologie di assi circolanti (i veicoli a 5 o più assi, dotati di ruote singole radiali, verosimilmente offrono il contributo maggiore nello sviluppo del danno);
- una relazione tra rigidità del conglomerato e la percentuale dei vuoti e l'invecchiamento della miscela non è evidente; non mancano infatti risultati in controtendenza: presumibilmente occorre considerare, in aggiunta ai vuoti e all'età del conglomerato, altri parametri della miscela (assortimento granulometrico, quantità di legante, RAP, ecc), al fine di avere una lettura più chiara della situazione;
- una relazione tra resistenza a trazione indiretta del conglomerato e la percentuale dei vuoti e l'invecchiamento della miscela, alla stessa maniera di quanto osservato per gli esiti delle prove di modulo, non è chiara. Non mancano dati controversi alla relazione: al fine di cogliere un trend più preciso ed esplicito, verosimilmente è necessario considerare anche altri parametri della miscela, poiché la sola considerazione dei vuoti e dell'invecchiamento del conglomerato non sono sufficienti a caratterizzare in maniera completa il problema;
- attraverso il calcolo di un indice sperimentale, elaborato a seguito di una prova a trazione indiretta, è possibile offrire una caratterizzazione sintetica della resistenza a fessurazione superficiale del conglomerato in esame. L'analisi dei valori dell'indice, calcolato per i provini testati, ha mostrato una buona sensibilità nei confronti dei vuoti e dell'invecchiamento, suggerendone un impiego futuro all'interno di indagini sperimentali sulla valutazione del TDC.

# Bibliografia

- [1] Santagata F. A., *“Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali”*, Pearson, 2016
- [2] COST 334, *“Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres”*, European Commission, Directorate General Transport, Final Report, 2001
- [3] Baladi G. Y., Schorsh M., Svasdisant T., *“Determining the Causes of Top-Down Cracks in Bituminous Pavements”*, Michigan State University PRCE, Final Report, 2002
- [4] Pellinen T., Rowe G., Biswas K., *“Evaluation of Surface (Top Down) Longitudinal Wheel Path Cracking”*, Indiana Department of Transportation & FHWA, Final Report, 2004
- [5] Myers L. A., Roque R., *“Top-Down Crack Propagation in Bituminous Pavements and Implications for Pavement Management”*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 71, 2002
- [6] Roque R., Kim Y. R., Guddati M. N., Zou J., Baek C., Thirunavukkarasu S., Underwood S., *“Top-Down Cracking of Hot-Mix Asphalt Layers: Models for Initiation and Propagation”*, NCHRP Web-Only Document 162, 2010
- [7] Myers L. A., Roque R., Ruth B. E., Drakos C., *“Measurement of Contact Stresses for Different Truck Tire Types to Evaluate Their Influence on Near Surface Cracking and Rutting”*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1655, 1999
- [8] Foley G. D., Sharp K. G., *“Relative Effects of Wide Base Radial Tyres on Pavement Performance”*, Australian Road Research Board, Research Report ARR 351, 2001
- [9] Lytton R. L., Xue L., Fan G., Meng L., *“Review of mechanistic-empirical modeling of top-down cracking in asphalt pavements”*, Construction and Building Materials, Vol. 191, 2018
- [10] Lytton R. L., Xue L., Yu C., Sheng H., Meng L., *“A calibrated mechanics-based model for top-down cracking of asphalt pavements”*, Construction and Building Materials, Vol. 208, 2019
- [11] Greene J., Toros U., Kim S., Byron T., Choubane B., *“Impact of Wide-Base Single Tyres on Pavement Damage”*, State of Florida, Research Report 09-258, 2009
- [12] Mun S., Guddati M. N., Kim Y. R., *“Fatigue Cracking Mechanism in Asphalt Pavements with Viscoelastic Continuum Damage Finite Element Program”*,

Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1896, 2004

[13] Nikolaides A., Manthos E. “*Determination of asphalt layer thickness above which load-induced strains initiate top-down cracking and the effect of asphalt stiffness variation between wearing course and rest of asphalt layers*”, Bituminous Mixtures and Pavements, Vol. 7, 2019

[14] Chen C., Moore N., West R., Yin F., Taylor A., “*Evaluation and comparison of cracking tests for top-down cracking resistance of asphalt mixtures*”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2019

[15] Birgisson B., Roque R., Varadhan A., Thai T., Jaiswal L., “*Evaluation of Thick Open Graded and Bonded Friction Courses for Florida*”, Final Report of Florida Department of Transportation, 2006

[16] Chen Y., Tebaldi G., Roque R., Lopp G., Su Y., “*Effects of Interface Condition Characteristics on Open-Graded Friction Course Top-Down Cracking Performance*”, Road Materials and Pavement Design, 13:sup1, 2012

[17] Koh C., “*Tensile Properties of Open Graded Friction Course (OFGC) Mixture to Evaluate Top-Down Cracking Performance*”, PhD Dissertation, University of Florida, 2009

[18] Roque R., Birgisson B., Sangpetngam B., Zhang Z., “*Hot Mix Asphalt Fracture Mechanics: A Fundamental Crack Growth Law for Asphalt Mixtures*”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 71, 2002

[19] Zhang Z., Roque R., Birgisson B., Sangpetngam B., “*Identification and Verification of a Suitable Crack Growth Law*”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70, 2001

[20] Roque R., Birgisson B., Drakos C., Dietrich B., “*Development and Field Evaluation of Energy Based Criteria for Top-Down Cracking Performance of Hot Mix Asphalt*”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 73, 2004

[21] Roque R., Zou J., “*Top-Down Cracking: Enhanced Performance Model and Improved Understanding of Mechanisms*”, Asphalt Paving Technology, Vol. 80, 2011

[22] Birgisson B., Dinegdae Y.H., “*Effects of truck traffic on top-down fatigue cracking performance of flexible pavements using a new mechanics-based analysis framework*”, Road Materials and Pavement Design, 2016

- [23] Moore N.M., Taylor A.J., West R.C., Luo X., Gu F., “*Energy-based crack initiation model for load-related top-down cracking in asphalt pavement*”, Construction and Building Materials, 2018
- [24] Moore N.M., “*Evaluation of Laboratory Cracking Tests Related to Top-Down Cracking in Asphalt Pavements*”, thesis submitted to the Graduate Faculty of Auburn University, 2016
- [25] Taylor A., West R.C., Gu F., Chen C., “*Development of a new cracking index for asphalt mixtures using indirect tensile creep and strength test*”, Construction and Building Materials, Vol. 225, 2019
- [26] Lytton R., Zhou F., Newcomb D., Gurganus C., Banihashemrad S., Park E.S., Sakhaeifar M., “*Experimental design for field validation of laboratory tests to assess cracking resistance of asphalt mixtures*”, Project Final Report NCHP 09-57, 2016
- [27] Zhou F., Hu S., Chen D.H., Scullion T., “*Overlay Tester: Simple Performance Test for Fatigue Cracking*”, Transportation Research Record, Vol. 2001, 2007
- [28] Doll B., Ozer H., Al-Qadi I.L., Lambros J., El-Khatib A., Singhvi P., “*Development of the fracture-based flexibility index for asphalt concrete cracking potential using modified semi-circle bending test parameters*”, Construction and Building Materials, Vol. 115, 2016
- [29] Im S., Zhou F., “*New and simpler cracking test method for asphalt mix designs*”, Transportation Research Record, Vol. 2631, 2017
- [30] Zhou F., Im S., Sun L., Scullion T., “*Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design and QC/QA*”, Road materials and pavement design, Vol. 18, 2017
- [31] Sun L., Ma Z., Liu L., “*Investigation of top-down cracking performance of in-situ asphalt mixtures based on accelerated pavement testing and laboratory tests*”, Construction and Building Materials, Vol. 179, 2018
- [32] Chen X., Huang B., Xu Z., “*Uniaxial Penetration Testing for Shear Resistance of Hot-Mix Asphalt Mixtures*”, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2006
- [33] Sun L., Wang G., Zhang H., Liu L., “*Initiation and Propagation of Top-Down Cracking in Asphalt Pavement*”, Applied Sciences, 2018
- [34] Domenichini L., Di Mascio P., Giannattasio P., Caliendo C., Festa B., Marchionna A., Finni P., Molinaro E., Paoloni G., “*Modello di Catalogo delle Pavimentazioni Stradali*”, C.N.R. Gruppo di lavoro Progettazione Pavimentazioni, 1993
- [35] UNI EN 12697-26, “*Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 26: Rigidezza*”, 2018

[36] UNI EN12697-23, “*Miscela bituminosa - Metodi di prova - Parte 23: Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi*”, 2018