

# FACOLTÀ DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E TERRITORIALE

Corso di Laurea in Ingegneria Civile

# L'ADERENZA IN AMBITO STRADALE:

# fattori di influenza e metodi di misura

RELATORE: Prof. Ing. E. Toraldo CORRELATORE: Ing. F. Giustozzi

Tesi di laurea di:

Riccardo Rossano matr. 797730

Anno accademico 2014-2015

# Ringraziamenti

Voglio ringraziare il Prof. Ing. Emanuele Toraldo e l'Ing. Filippo Giustozzi che si sono resi disponibili per seguirmi con la mia tesi e mi hanno dedicato il loro tempo e le loro conoscenze.

Ringrazio la mia famiglia e i miei parenti che mi hanno sostenuto con la loro presenza in questi anni universitari e non solo.

Ringrazio tutti miei compagni di corso e avventura, con cui ho passato momenti felici e che sono stati sempre presenti anche nei momenti di difficoltà. Sono sicuro che questi legami proseguiranno anche oltre le aule universitarie.

Ringrazio tutti i miei amici che mi sono stati vicini e mi hanno sopportato durante tutte le stressanti sessioni di esame.

Ringrazio tutti quelli che hanno avuto pazienza.

## Abstract

In this thesis I have developed the study of friction on the road and the mechanism of contact between tires and pavement, both of them are important elements for the design of any road. Moreover, the evolution obliges the proper planning of adequate maintenance operations.

Many articles have been written about this subject and I tried to extract from each one the main elements to give a comprehensive view on road friction and its performance over time.

At first it will be illustrated the friction and texture of the pavement, closely linked, then the mechanisms and the instruments used to measure them.

After having defined the properties of friction, the factors of most influence will be studied in more details, especially the presence of water, the polishing of the aggregates and the temperature.

In a second phase, I analyzed the models and devices that are better able to describe the friction in lab. The image analysis is leading to good results as regards estimations of friction without direct contact between the device and pavement.

The last part of this thesis deals with the different units used to measure the frictions and their correlations.

## Sommario

In questa tesi verrà trattato lo studio dell'aderenza in ambito stradale e il meccanismo di contatto tra pneumatico e pavimentazione, elementi importanti per la progettazione di qualsiasi strada e la cui evoluzione nel tempo obbliga i gestori alla programmazione di adeguate operazioni manutentive.

Sono stati scritti molti articoli sull'argomento e si è cercato di estrarre da ognuno gli elementi ritenuti in grado di dare un esaustivo panorama sull'aderenza e il suo andamento nel tempo.

In principio si illustreranno con un'introduzione l'aderenza e la tessitura della pavimentazione, che sono strettamente legate, i meccanismi che le governano e gli strumenti utilizzati per rilevarle in situ.

Definite così le loro proprietà si studieranno in modo più approfondito i fattori che più influenzano l'aderenza: in particolare la presenza di acqua, la pulitura degli aggregati e la temperatura.

In una seconda fase si analizzeranno i modelli e i dispositivi che meglio sono riusciti a descrivere l'aderenza in laboratorio e l'analisi delle immagini che sta portando a buoni risultati per quanto riguardo i rilievi dell'aderenza privi di contatto diretto tra dispositivo e pavimentazione.

L'ultima parte di questa tesi riguarda le diverse unità di misura utilizzate per misurare l'aderenza e le correlazioni tra loro.

# Indice

CAPITOLO 1 – L'aderenza in ambito stradale	14
1.1 Introduzione all'aderenza	14
1.1.1 Le forze di attrito longitudinali	15
1.1.2 L'ellisse di aderenza	18
1.2 Il meccanismo dell'aderenza: adesione e isteresi	20
1.3 I fattori che influenzano l'aderenza	22
1.4 Strumenti di misura dell'aderenza	24
1.4.1 I dispositivi di prova che richiedono un controllo del traffico	24
1.4.1 I dispositivi di prova che effettuano misurazioni a velocità elevate	26
1.5 La tessitura della pavimentazione	29
1.5.1 I fattori che influenzano la tessitura	31
1.5.2 Strumenti di misura della tessitura	32
CAPITOLO 2 – I fattori che influenzano l'aderenza in ambito stradale	36
2.1 La presenza di acqua e l'altezza critica	36
2.2 Polishing	48
2.3 Temperatura e stagionalità	52
CAPITOLO 3 – La misura dell'aderenza in laboratorio e in situ	59
3.1 Il modello fisico	59
3.2 Simulare la pulitura degli aggregati in laboratorio	64
3.3 Analisi delle immagini per ricavare la micro-tessitura in situ	73
CAPITOLO 4 – Indici per la valutazione dell'aderenza	78
4.1 Skid Number	78
4.2 International Friction Index	79
4.3 Rado IFI	81
4.4 Correlazioni tra i diversi indici	83

4.4.	.1 La macro-tessitura	33
4.4.	.2 L'aderenza	34
Bibliogra	afia8	38

# Indice delle Figure

Figura 1 - Diagramma delle forze agenti su un pneumatico14
Figura 2 - Forza di resistenza al rotolamento nel caso di libero rotolamento e velocità costante16
Figura 3 - Forze e momenti agenti su un pneumatico sottoposto a frenatura costante17
Figura 4 - L'aderenza in funzione dello slittamento del pneumatico
Figura 5 - Rappresentazione dell'elisse di aderenza18
Figura 6 - Forze di frenatura e laterali espressi in funzione dello scorrimento longitudinale19
Figura 7 - Il meccanismo dell'aderenza20
Figura 8 - Effetto di una pellicola d'acqua sull'andamento dell'aderenza
Figura 9 - A destra il BPT e a sinistra la fotografia di un Dynamic Friction Tester
Figura 10 - Misuratore di decelerazione montato su un veicolo
Figura 11 - Esempio di un dispositivo che utilizza un metodo a ruota bloccata per il rilevamento
dell'aderenza27
Figura 12 - A sinistra l'immagine di un Mu-Meter a destra quella di uno SCRIM
Figura 13 - Immagine di un ASF durante una misurazione28
Figura 14 - Illustrazione semplificata della suddivisione nei tre tipi di tessitura
Figura 15 - Influenza delle diverse lunghezze d'onda sulle interazioni ruota-pavimentazione30
Figura 16 - Influenza di macro e micro-tessitura sull'aderenza per differenti velocità di
scivolamento
Figura 17 - Due esempi di trattamenti superficiali di Diamond Grinding
Figura 18 - Partendo da sinistra sono illustrati Il SPM, OFM e il CTM
Figura 19 – Correlazione tra incidenti in condizioni di pavimentazione bagnata e profondità della
macro-tessitura
Figura 20 - Zona di contatto tra pneumatico e pavimentazione
Figura 21 - L'influenza della profondità della pellicola d'acqua e la velocità di scorrimento
sull'aderenza
Figura 22 - Partendo da sinistra: particelle di corindone, strumento per la sabbiatura e le diverse
zone del provino sottoposte ad un diverso numero di passaggi
Figura 23 - Andamento dell'aderenza in funzione della profondità dell'acqua40
Figura 24 - Effetto della micro-tessitura superficiale sulla curva aderenza-profondità d'acqua41
Figura 25 - Individuazione della profondità critica dell'acqua42

Figura 26 - Illustrazione delle forze agenti su un cursore di gomma che si muove sopra un'asperità
conica
Figura 27 - Rappresentazione del profilo degli aggregati e livello dell'acqua
Figura 28 - Andamento teorico dell'aderenza in funzione dell'altezza d'acqua45
Figura 29 - Comparazione tra le curve del coefficiente di aderenza calcolato con il modello e
misurato in laboratorio47
Figura 30 – Modello generale dell'evoluzione dell'aderenza nel tempo
Figura 31 - Meccanismi di pulitura degli aggregati: Generale e Differenziale
Figura 32 - Comparazione tra aggregati e conglomerati (a, b, c) e tra i tre tipi di aggregati (d)50
Figura 33 - Coefficienti di aderenza per conglomerati e aggregati granitici (a) e di grovacca (b)51
Figura 34 - Coefficiente di aderenza in funzione della PT con rapporto di scorrimento paria a 20%.
Figura 35 - Coefficiente di aderenza in funzione della PT con rapporto di scorrimento paria a 86%.
Figura 36 - Coefficiente di aderenza in funzione della PT con rapporto di scorrimento paria a 100%.
Figura 37 - Coefficiente di aderenza in funzione della PT con rapporto di scorrimento paria a 20%.
Figura 38 - Coefficiente di aderenza in funzione della PT con rapporto di scorrimento paria a 86%.
Figura 39 - Coefficiente di aderenza in funzione della PT con rapporto di scorrimento paria a 100%.
Figura 40 - Coefficiente di aderenza in funzione della CAT con rapporto di scorrimento pari a 20%
(a) e 86% (b)
Figura 41 - Illustrazione dei campioni estratti dai diversi siti
Figura 42 - Andamento del coefficiente di aderenza in funzione del numero di passaggi60
Figura 43 - Modello del coefficiente µG adattato alle misurazioni
Figura 44 - Modello di "d" in funzione del numero di passaggi "N"62
Figura 45 - Comparazione tra il modello e i dati ricavati in sito
Figura 46 - Macchina di Wehner-Schulze e particolari della testina di pulitura (sinistra) e testina per
la misurazione dell'aderenza (destra)65
Figura 47 - Esempio di campioni sottoposti a pulitura con la macchina di Wehner-Schulze65

Figura 48 - Esempio della curva di frenatura ottenuta dalla macchina di Wehner-Schulze66
Figura 49 - Andamento delle curve dell'aderenza ottenute per i tre diversi siti in laboratorio68
Figura 50 - Confronto tra curve dell'aderenza simulate e misurazioni in situ
Figura 51 - Confronto tra l'evoluzione dell'aderenza di campioni di conglomerato e dischi compost
da soli aggregati
Figura 52 - Confronto tra i risultati ottenuti utilizzando diversi agenti pulenti
Figura 53 - Influenza dell'acqua sull'aderenza in funzione di diversi agenti pulenti
Figura 54 - L'Aachen Polishing Machine72
Figura 55 - Illustrazione concettuale della misurazione dell'aderenza senza contatto
Figura 56 -Comparazione tra dati misurati e calcolati per mezzo del modello
Figura 57 - Rappresentazione dell'aderenza secondo il modello IFI
Figura 58 - Confronto tra i modelli di aderenza IFI e Rado IFI

# Indice Delle Tabelle

# CAPITOLO 1 – L'aderenza in ambito stradale

## 1.1 Introduzione all'aderenza

L'aderenza è la forza che resiste al moto relativo tra lo pneumatico di un veicolo e la pavimentazione. Questa forza resistente è generata quando lo pneumatico ruota o scivola sulla pavimentazione come illustrato in Figura 1.



Figura 1 - Diagramma delle forze agenti su un pneumatico.

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

Si può esprimere con la seguente formula (1.1.1):

$$\mu = \frac{F}{F_W} \tag{1.1.1}$$

L'aderenza ricopre un ruolo essenziale per quando riguarda la sicurezza della circolazione mantenendo i veicoli in carreggiata e permettendo al guidatore di controllare il proprio mezzo in maniera sicura, sia in direzione longitudinale che trasversale. In generale maggiore è l'aderenza maggiore è il controllo che il pilota ha sul veicolo. Anche se raramente un evento incidentale è dovuto a una bassa aderenza è possibile che una manovra azzardata, effettuata da un guidatore, richieda un'aderenza maggiore della massima che la pavimentazione può fornire.

Questo è importante anche per poter dimensionare in modo corretto la geometria delle strade, l'aderenza influenza direttamente la minima distanza di frenata, il raggio delle curve e l'elevazione delle stesse.

#### 1.1.1 Le forze di attrito longitudinali

Le forze di attrito longitudinali si sviluppano tra lo pneumatico e la superficie della pavimentazione durante il libero rotolamento o con frenatura costante. Nel primo caso, quello di libero rotolamento, la velocità relativa tra lo pneumatico e la pavimentazione, chiamata velocità di scorrimento è zero. In caso invece di una frenatura costante si ha un aumento della velocità di scorrimento fino ad un massimo pari alla velocità stessa del veicolo.

La seguente formula esprime la velocità di scorrimento (1.1.2):

$$S = V - V_P = V - (0.278 \times \omega \times r) \tag{1.1.2}$$

Dove:

- S è la velocità di scorrimento espressa in km/h,
- V è la velocità del veicolo espressa in km/h,
- $V_P$  è la velocità tangenziale media dello pneumatico espressa in km/h,
- $\omega$  è la velocità angolare espressa in radianti/s,
- r è il raggio dello pneumatico espresso in metri.

Quando  $V_P$  è uguale alla velocità del veicolo, la condizione di libero rotolamento, allora S è pari a zero. Nel caso di una ruota frenata,  $V_P$  risulta pari a zero e la velocità di scorrimento S è pari alla velocità del veicolo stesso.

Il rapporto di scorrimento è un secondo modo per indicare le due diverse condizioni ed è rappresentato dalla seguente espressioni (1.1.3):

$$SR = \frac{V - V_P}{V} \times 100 = \frac{S}{V} \times 100$$
 (1.1.3)

Dove:

- SR è il rapporto di scorrimento espresso in percentuale,
- V è la velocità del veicolo espressa in km/h,
- V<sub>P</sub> la velocità tangenziale del pneumatico espressa in km/h,

• *S* è la velocità di scorrimento espressa in km/h.

Come visto precedentemente quando la velocità tangenziale è uguale alla velocità del veicolo risulta S pari a zero e quindi un rapporto di scorrimento pari a SR=0%. Nel caso di ruota bloccata la velocità tangenziale assume il valore zero, la velocità di scorrimento S è pari alla velocità del veicolo e dunque risulta una rapporto di scorrimento pari a SR=100%.

La Figura 2 illustra le forze agenti su un pneumatico in libero rotolamento. In questa condizione la reazione vincolare  $F_G$  ha punto di applicazione coincidente con il centro di pressione dell'area di contatto tra pneumatico e pavimentazione che risulta spostato rispetto al centro del pneumatico stesso di una quantità "*a*". Si viene così a creare un momento che deve essere superato per poter mettere in rotazione la ruota. La forza necessaria per neutralizzare questo momento viene chiamata forza di resistenza al rotolamento  $F_R$ . Il valore "*a*" dipende dalla velocità ed aumenta con essa. Dunque la stessa  $F_R$  aumenta con l'aumentare della velocità.



Figura 2 - Forza di resistenza al rotolamento nel caso di libero rotolamento e velocità costante.

La Figura 3 illustra il caso di una ruota sottoposta ad una frenatura costante, è necessaria una forza addizionale, detta forza di frenatura  $F_B$ , proporzionale alla frenatura stessa, per contrastare il momento frenante  $M_B$ . La forza di attrito totale è data dalla somma della resistenza al libero rotolamento  $F_R$  e la forza frenante  $F_B$ .



*Figura 3 -* Forze e momenti agenti su un pneumatico sottoposto a frenatura costante.

Il coefficiente di attrito tra pneumatico e pavimentazione cambia con il variare dello slittamento del pneumatico come mostrato in Figura 4. L'aderenza aumenta rapidamente e raggiunge un picco massimo ad un valore chiamato slittamento critico, pari circa al 10-20%. L'aderenza diminuisce fino a stabilizzarsi ad un valore raggiunto al 100% detto coefficiente di attrito radente.

La relazione mostrata in Figura 4 è alla base della tecnologia dell'ABS (anti-locking brake system) che minimizza la perdita di aderenza dovuta allo scivolamento. Attivando ripetutamente i freni il coefficiente di aderenza si mantiene vicino al suo picco massimo.



Figura 4 - L'aderenza in funzione dello slittamento del pneumatico.

#### 1.1.2 L'ellisse di aderenza

Sui pneumatici di un veicolo in movimento non agiscono solo forze longitudinali ma anche trasversali quali la forza centrifuga che agisce sul veicolo mentre viene percorsa una curva circolare, durante i cambi di direzione e per la presenza di vento trasversale al senso del moto. Si generano sulla superficie di contatto tra pneumatico e pavimentazione delle reazioni che impediscono la traslazione laterale del veicolo. Nel caso di forze trasversali si parla di aderenza trasversale e coefficiente di aderenza trasversale.

Il rapporto che lega il coefficiente di aderenza longitudinale e trasversale può essere rappresentato da un'elisse che esprime l'andamento del coefficiente di aderenza al variare della risultante delle forze longitudinali e trasversali come mostrato in Figura 5.



Figura 5 - Rappresentazione dell'elisse di aderenza.

La quota parte di aderenza longitudinale y e di l'aderenza trasversale x che possono contemporaneamente essere applicate sono ricavabili dall'equazione (1.1.4):

$$\frac{x^2}{\mu_l^2} + \frac{y^2}{\mu_l^2} = 1 \tag{1.1.4}$$

Dove:

- $\mu_l$  è il coefficiente di aderenza longitudinale;
- $\mu_t$  è il coefficiente di aderenza trasversale.

Conoscendo il coefficiente di aderenza impiegato in una direzione è possibile per mezzo dell'ellisse calcolare l'aderenza disponibile nella direzione ortogonale.

Tra pneumatico e pavimentazione si può sviluppare una forza di aderenza massima che deve essere scomposta tra le sue due componenti longitudinale e trasversale. Se tutta l'aderenza disponibile viene utilizzata da solo una delle due componenti non esiste una riserva per compensare eventuali forze ortogonali e ciò porta alla perdita di controllo del veicolo.

L'andamento delle forze longitudinali e trasversali in funzione dello scorrimento longitudinale è illustrato in Figura 6.



Figura 6 - Forze di frenatura e laterali espressi in funzione dello scorrimento longitudinale.

## 1.2 Il meccanismo dell'aderenza: adesione e isteresi

L'aderenza è dovuta alla stretta interazione tra due diverse forze che la compongono, l'adesione e l'isteresi. Entrambi i meccanismi sono illustrati in Figura 7.



Figura 7 - Il meccanismo dell'aderenza.

L'adesione è l'attrito che si viene a creare a causa dell'incastro e dell'adesione, a scala ridotta, tra la gomma del pneumatico e la superficie della pavimentazione. Dipende dalla resistenza al taglio all'interfaccia e dall'area di contatto. L'isteresi è causata dalla perdita di energia dovuta alla deformazione subita dal pneumatico. La deformazione è comunemente indicata come l'avvolgimento del pneumatico intorno alla tessitura. Quando avviene la compressione del pneumatico contro la superficie, la distribuzione degli sforzi porta all'immagazzinamento dell'energia di deformazione all'interno della gomma. Una parte di questa energia viene trasformata in calore nel momento in cui il pneumatico torna a rilassarsi. Questa parte di energia persa aiuta a fermare l'avanzamento.

Esistono anche altre componenti dell'aderenza ma hanno valori insignificanti rispetto a quelli dell'adesione e dell'isteresi. L'aderenza può quindi essere espressa come la somma delle forze di attrito dovute all'adesione e all'isteresi (1.2.1).

$$F = F_A + F_H \tag{1.2.1}$$

Dove:

•  $F_A$  componente dell'aderenza dovuta all'adesione,

•  $F_H$  componente dell'aderenza dovuta all'isteresi.

Entrambe le componenti dell'aderenza dipendono dalle caratteristiche superficiali della pavimentazione, dal contatto che si crea tra pneumatico e pavimentazione e dalle proprietà e caratteristiche del pneumatico stesso. Essendo lo pneumatico di materiale gommoso con caratteristiche visco-elastiche, ricoprono un ruolo importante anche la temperatura e la velocità di scorrimento.

La forza di adesione si sviluppa lungo l'interfaccia pneumatico-pavimentazione e dipende principalmente dalle asperità degli aggregati contenuti nella pavimentazione (micro-tessitura). La componente dell'isteresi al contrario si sviluppa all'interno dello pneumatico e risponde in misura maggiore alle irregolarità formate in superficie (macro-tessitura) attraverso il mix-design o le diverse tecniche costruttive.

## 1.3 I fattori che influenzano l'aderenza

I fattori che influenzano l'aderenza possono essere raggruppati in quattro differenti categorie:

- 1. Caratteristiche superficiali della pavimentazione:
  - Mirco-tessitura,
  - Macro-tessitura,
  - Mega-tessitura,
  - Temperatura,
  - Proprietà dei materiali.
- 2. Proprietà dello pneumatico:
  - Disegno del battistrada e le sue condizioni,
  - Composizione e durezza della gomma,
  - Temperatura,
  - Carico,
  - Pressione di gonfiaggio.
- 3. Parametri operativi del veicolo:
  - Velocità di scorrimento,
    - Velocità del veicolo,
    - > Azione frenante.
  - Manovre di guida,
    - Svolta,
    - Sorpasso.
- 4. Fattori ambientali:
  - Fattori climatici,
    - > Vento,
    - > Temperatura,
    - Acqua,
    - ➢ Neve e ghiaccio.
  - Contaminanti,
    - Sporco, fango e detriti,
    - > Materiali antiscivolo come sale e sabbia.

Ognuno di questi fattori influisce sull'aderenza che deve essere vista non come una proprietà della sola pavimentazione ma come l'insieme di diverse condizioni. Solo quando tutti questi fattori sono ben indicati è possibile ottenere un valore preciso dell'aderenza. I fattori più importanti, che assumono un ruolo di spicco per il progettista stradale, verranno trattati in modo più specifico nel seguente capitolo. Si tratta della micro-tessitura, la macro-tessitura, le proprietà dei materiali che costituiscono la strada e l'influenza dei fattori ambientali quali la temperatura e la presenza di acqua. Di seguito viene illustrata l'influenza che ha una pellicola d'acqua sull'aderenza nel caso di tre diversi tipi di pneumatici Figura 8.



Figura 8 - Effetto di una pellicola d'acqua sull'andamento dell'aderenza.

## 1.4 Strumenti di misura dell'aderenza

Esistono diversi strumenti di misura dell'aderenza, ognuno con le proprie caratteristiche peculiari e che possono essere anche molto differenti l'uno dall'altro. Si possono effettuare misurazioni a velocità di scorrimento fisse o variabili, velocità del veicolo operativo molto varie e diverse caratteristiche del pneumatico di prova.

Possono essere suddivisi in due categorie:

- Strumenti di prova che effettuano misurazioni a velocità elevate,
- Strumenti di prova che richiedono un controllo del traffico.

In generale gli strumenti che richiedono la chiusura della corsia sono meno costosi e più precisi. Al contrario i dispositivi che effettuano le misurazioni effettuate a velocità elevate sono molto più complessi e per essere utilizzati necessitano di una preparazione specifica. Tuttavia con il recente sviluppo di nuove tecnologie questi apparecchi sono diventati sempre più precisi conoscendo una sempre maggiore diffusione. Nei due paragrafi successivi verranno trattati in modo più specifico i principali dispositivi appartenenti alle due diverse famiglie.

### 1.4.1 I dispositivi di prova che richiedono un controllo del traffico

• Strumenti portatili:

Questi apparecchi sfruttano la teoria del pendolo per misurare l'aderenza sia in laboratorio sia in situ.

Il British Pendulum Tester (ASTM E303) produce uno scorrimento a basse velocità tra la superficie della pavimentazione e un pattino in gomma. L'altezza raggiunta dal braccio del pendolo dopo il contatto fornisce un'indicazione dell'aderenza. Solitamente vengono effettuate cinque diverse misurazioni.

Il Dynamic Friction Tester (ASTM E1911) misura la torsione necessaria per ruotare tre cuscinetti in gomma a contatto con la pavimentazione, in un percorso circolare con velocità comprese tra i 5 e 90 km/h. Vengono versati sulla pavimentazione, durante il test, 3.6 litri di acqua al minuto. La velocità di rotazione, il carico applicato sui cuscinetti e la coppia vengono rilevate elettronicamente. Può essere trasportato nel bagagliaio di un'automobile insieme con un computer portatile per le misurazioni e ad un serbatoio d'acqua. Entrambi gli apparecchi sono illustrati in Figura 9.



*Figura 9 -* A destra il BPT e a sinistra la fotografia di un Dynamic Friction Tester.

• Misuratore della distanza d'arresto (ATM E445):

Si tratta di un metodo che prevede l'utilizzo di un'autovettura dotata di un sistema di frenata capace di bloccare completamente le ruote. La pavimentazione viene bagnata con acqua fino a quando non risulta satura. Il veicolo viene guidato ad una velocità costante. Si effettua una frenatura completa con bloccaggio delle ruote e si misura la distanza percorsa dal veicolo prima di fermarsi. Per mezzo di una equazione è possibile ricavare il coefficiente di aderenza in funzione della distanza di arresto (1.4.1).

$$\mu = \frac{v^2}{2 \times g \times d} \tag{1.4.1}$$

Dove:

- $\blacktriangleright$   $\mu$  è il coefficiente di aderenza,
- $\succ v$  è la velocità del veicolo nell'istante in cui inizia la frenata,
- g è l'accelerazione di gravità,
- d la distanza di arresto.
- Misuratore di decelerazione (ASTM E2101):

Viene installato su un'autovettura un sistema capace di misurare la decelerazione durante la frenata come illustrato in Figura 10. Il veicolo viaggia a una velocità standard compresa tra i 32 e i 48 km/h. La decelerazione può essere calcolata sia fino al completo arresto del veicolo sia come rapporto tra la differenza tra velocità iniziale e finale del veicolo e la durata della frenata. Si utilizza la seguente equazione (1.4.2):

$$\mu = \frac{DM}{g}$$

Dove:

- $\succ$   $\mu$  è il coefficiente di aderenza,
- > DM è la decelerazione misurata,
- ➢ gl'accelerazione di gravità.



(1.4.2)

Figura 10 - Misuratore di decelerazione montato su un veicolo.

#### 1.4.1 I dispositivi di prova che effettuano misurazioni a velocità elevate

• A ruota bloccata (Locked-Wheel ASTM E274):

Questo tipo di dispositivo è installato su un rimorchio che viene trainato dal veicolo di misurazione come illustrato in Figura 11. Viene applicata acqua sulla pavimentazione davanti al pneumatico di prova che viene completamente bloccato dal sistema frenante e si effettua la misurazione della forza di resistenza al trascinamento. Una volta che la ruota di prova è tornata nelle condizioni di libero rotolamento si può effettuare la misura successiva. La ruota di prova può essere equipaggiata sia con uno pneumatico liscio, più sensibile alla macro-tessitura della pavimentazione, sia con pneumatico scolpito, più sensibile invece dalla micro-tessitura. Può essere utilizzato solo in tratti rettilinei.



*Figura 11 - Esempio di un dispositivo che utilizza un metodo a ruota bloccata per il rilevamento dell'aderenza*.

• A forza trasversale (Side-force ASTM E670):

A questa tipologia appartengono le apparecchiature che sfruttano la forza trasversale agente su uno o due pneumatici inclinati per calcolare l'aderenza. Viene versata acqua di fronte alle ruote di prova a cui è permesso di ruotare liberamente. Vengono misurate la velocità e la distanza percorsa dal veicolo, il carico e la forza trasversale agente sul pneumatico di prova. I dati vengono raccolti ogni 10 cm circa e viene effettuata una media ogni metro di misurazione. Sono molto sensibili alle irregolarità della pavimentazione che possono rapidamente rovinare i pneumatici. Due esempi di dispositivi di questo tipo sono lo Sideway Force Coefficent Routine Investigation Machine (SCRIM) e il Mu-Meter, utilizzato soprattutto in ambito aeroportuale, rappresentati in Figura 12.



Figura 12 - A sinistra l'immagine di un Mu-Meter a destra quella di uno SCRIM.

• A scorrimento fisso (Fixed-slip ASTM E2340):

I dispositivi a scorrimento-fisso misurano la resistenza alla rotazione di un pneumatico liscio a una velocità di scorrimento costante. Viene versata acqua davanti al pneumatico di prova retrattile che è montato su un veicolo di prova o su un rimorchio. La velocità del pneumatico di prova viene limitata a una percentuale della velocità del veicolo per mezzo di una cinghia meccanica o di un sistema di frenatura. I dati raccolti sono il carico agente sulla ruota e la resistenza al trascinamento che permettono di calcolare il coefficiente di aderenza. I dati vengono raccolti in continuo e mediati su intervalli di un metro. Un esempio di questi apparecchio è l'Airport Surface Friction Tester (ASFT) illustrato in Figura 13 dove si può notare la ruota di prova abbassata e la scia d'acqua



Figura 13 - Immagine di un ASF durante una misurazione.

• A scorrimento variabile (Variable-slip ASTM E1859):

Si tratta di dispositivi che misurano l'aderenza in funzione della velocità di scorrimento tra la ruota e la pavimentazione. Viene bagnata la pavimentazione di fronte al pneumatico di prova. Alla ruota inizialmente è permessa una rotazione libera per poi essere gradualmente ridotta. Il sistema fornisce un grafico dello Slip Friction Number in funzione della velocità di scorrimento. Sono i dispositivi più complessi che forniscono però la maggior quantità di dati possibili. Due esempi di questi tipi di dispositivi sono l'IMAG e il ROAR.

### 1.5 La tessitura della pavimentazione

La tessitura della pavimentazione viene definita come la differenza tra la forma della superficie della pavimentazione e una superficie perfettamente piana. Queste variazioni vengono suddivise dalla PIARC nel 1987 in tre livelli di tessitura diversi, ognuno caratterizzato da una propria lunghezza d'onda " $\lambda$ " e da una ampiezza "A":

- La micro-tessitura ( $\lambda < 0.5 \text{ mm}$  e  $1\mu m < A < 500\mu m$ ) è la rugosità superficiale che si riscontra a livello microscopico e non visibile. Dipende dalle caratteristiche superficiali degli aggregati contenuti nella pavimentazione;
- La macro-tessitura (0.5mm < λ < 50mm e 0.1mm < A < 20mm) è la rugosità della superficie dovuta alle dimensioni degli aggregati, al mix design e ai diversi metodi di rifinitura della superficie (texturing);</li>
- La mega-tessitura (50mm < λ < 500mm e 0.1mm < A < 50mm) è la tessitura con lunghezza d'onda paragonabile, come ordine di grandezza, alla zona di contatto tra ruota e pavimentazione. È in gran parte dovuta ai difetti e alle ondulazioni della superficie della pavimentazione.

Nella Figura 14 vengono illustrare le tre categorie di tessiture e anche un quarto livello che riguarda le asperità con lunghezze d'onda superiori al massimo di 500mm considerato dalla mega-tessitura.



Figura 14 - Illustrazione semplificata della suddivisione nei tre tipi di tessitura.

Le caratteristiche della tessitura superficiale della pavimentazione influenzano fortemente le interazioni ruota-pavimentazione come mostrato in Figura 15. L'aderenza, in particolare, dipende principalmente dalla micro e macro-tessitura che corrispondono rispettivamente ai fenomeni dell'aderenza e dell'isteresi.



Note: Darker shading indicates more favorable effect of texture over this range.

#### Figura 15 - Influenza delle diverse lunghezze d'onda sulle interazioni ruota-pavimentazione.

Nella Figura 6 viene invece illustrata l'influenza che macro-tessitura, micro-tessitura e velocità hanno sull'aderenza. La macro-tessitura influenza il rapporto aderenza-velocità e la pendenza del grafico, con una macro-tessitura maggiore il valore dell'aderenza diminuisce meno all'aumentare della velocità. All'aumentare della micro-tessitura si riscontra un aumento dell'aderenza. Per valori di micro-tessitura maggiori il grafico non cambia il proprio andamento ma viene traslato verso l'alto.



Figura 16 - Influenza di macro e micro-tessitura sull'aderenza per differenti velocità di scivolamento.

#### 1.5.1 I fattori che influenzano la tessitura

Sono diversi i fattori che possono influenzare la tessitura superficiale, che dipende dagli aggregati, dal binder, dal mix design e dai trattamenti superficiali a cui viene sottoposta dopo la posa in opera (texturing). Vengono riportati nell'elenco a seguire:

- Dimensione massima degli aggregati: la dimensione massima degli aggregati presenti in una pavimentazione rappresentano la lunghezza d'onda della macro-tessitura, se disposti in modo uniforme e ravvicinato.
- Tipologia di aggregato: da questa scelta dipende la durabilità, il fattore di forma e la spigolosità degli aggregati.
- Quantità e viscosità del binder: un binder troppo poco viscoso o una quantità troppo elevata di binder può causare refluimento che causa una riduzione della macro e microtessitura superficiale.
- Granulometria degli aggregati: influisce sulla stabilità della pavimentazione e dei vuoti d'aria al suo interno.
- Vuoti d'aria: una maggiore presenza di pori aumenta il drenaggio dell'acqua, che porta ad un aumento dell'aderenza e ad una riduzione del rumore.

- Spessore dello strato: uno spessore maggiore, nel caso di pavimentazioni porose, rende disponibile un maggiore volume per la dispersione dell'acqua superficiale.
- Trattamenti superficiali: dopo la posa in opera sono diversi i trattamenti artificiali che possono aumentare la macro-tessitura della pavimentazione. Un esempio è il Diamond Grinding che prevede l'incisione longitudinale della superficie della pavimentazione per mezzo di lame dotate di diamanti come mostrato in Figura 1.5.4. Le caratteristiche di questi trattamenti come ad esempio la presenza di scanalature, la loro larghezza e distanza influenzano in vario modo l'aderenza, le vibrazione e il rumore causato dal contatto ruotapavimentazione.





Figura 17 - Due esempi di trattamenti superficiali di Diamond Grinding.

### 1.5.2 Strumenti di misura della tessitura

Come per gli strumenti adibiti alla misura dell'aderenza anche quelli per il rilevamento della tessitura possono essere divisi in due categorie:

- Strumenti di prova che effettuano misurazioni a velocità elevate;
- Strumenti di prova che richiedono un controllo del traffico.

Dei dispositivi che necessitano della chiusura del tratto stradale al traffico fanno parte la prova di altezza in sabbia (Sand Patch Metod, SPM), l'outflow meter (OFM) e il circular texture meter (CTM).

La prova di altezza in sabbia mostrata in Figura 18, regolamentata dall'ASTM E965 [1], consiste in un rilevamento puntuale della macro-tessitura. Si distribuisce un volume conosciuto di sfere di vetro in maniera circolare su una superficie pulita e si misura il diametro del cerchio risultante. Il volume diviso per l'area del cerchio viene chiamato Mean Texture Depth (MTD) (1.5.1).

$$MTD = \frac{4V}{\pi \cdot D^2} \tag{1.5.1}$$

Dove:

- *V* è il volume di prova delle sfere in vetro (mm<sup>3</sup>);
- *D* è il diametro medio rilevato (mm).

È un metodo molto semplice e poco costoso, per questo motivo è molto diffuso. I contro sono una misura solo puntuale, la valutazione solo della macro-tessitura e la dipendenza dall'operatore che effettua la misurazione.



Figura 18 - Partendo da sinistra sono illustrati Il SPM, OFM e il CTM.

L'outflow meter, vedi Figura 18, è un test volumetrico capace di stimare la predisposizione all'hydroplaning di una superficie correlandolo con il tempo di drenaggio dell'acqua da sotto un pneumatico in movimento. Le specifiche da rispettare durante la prova sono espresse nell'ASTM E2380 [1]. Questo dispositivo consiste in un cilindro dotato di un anello di gomma alla base. Un sensore misura il tempo necessario per drenare una certa quantità d'acqua attraverso la tessitura superficiale (sotto il cilindro in gomma) e i vuoti interni alla pavimentazione. Il parametro misurato, chiamato outflow time (OFT), definisce la macro-tessitura. Maggiore è l'OFT, più la superficie risulta liscia e la macro-tessitura bassa. Anche questa tipologia di prova ha dei contro come ad esempio l'essere una misura puntuale, che richiede il controllo del traffico per essere

effettuata e non è ben correlata con gli indici MPD (Mean Profile Depth) e MTD (Mean Texture Depth) che rappresentano la macro-tessitura.

Il circular texture meter è anch'esso, come i due precedenti, uno strumento di misura puntuale. Le specifiche di questo tipo di dispositivo sono esposte nell'ASTM E21547 [1]. Si tratta di un dispositivo che sfrutta un laser e non il contatto per misurare la tessitura di un'area circolare della pavimentazione con diametro pari a 286mm. La misura viene effettuata con intervalli di 0.868mm e la velocità di rotazione dello strumento è di 6m/min. Le misurazioni generano tracce di profili che vengono inviate e immagazzinate in un computer portatile. Questo dispositivo fornisce due diversi indici della macro-tessitura:

- MPD (Mean Profile Depth), è la versione bidimensionale dell'indice MTD, rappresenta la media dei picchi massimi, calcolati in otto differenti settori, che compongono il cerchio su cui si effettua la misura.
- RMS (Root Mean Square), è un valore statistico che analizzato insieme all'indice MPD di stimare se la tessitura è positiva (rilievi superficiali) o negativa (depressioni).

È un dispositivo facile da trasportare (12kg circa) e che al contrario del SPM non dipende dalla sensibilità degli operatori. I contro, come nei due casi precedenti, sono la necessità di dover chiudere il tratto di strada al traffico e il rilievo solo puntuale della macro-tessitura.

Tra gli strumenti di prova che effettuano misurazioni della tessitura a velocità elevate il più diffuso è il Road Surface Analyzer (ROSANv). Questi dispositivi che sfruttano l'electro-optic method (EOM) sono basati su rilievi dei profili non attraverso il contatto diretto con la pavimentazione ma per mezzo di laser e altri strumenti ottici. La precisione verticale della misura è generalmente pari a 0.5 mm ma per alcuni strumenti anche migliore.

Il ROSANv è un sistema portatile che può essere facilmente montato su un veicolo e che, a differenza dei precedenti dispositivi presi in considerazione, fornisce una misurazione lineare e non solo puntuale della tessitura. Consiste in un laser montato sul paraurti anteriore del veicolo e che effettua misurazioni fino ad una velocità di 110 km/h. Calcola l'indice MPD e per mezzo di un'equazione (1.5.2) ricava anche l'Estimated Mean Texture Depth (EMTD) che fornisce una stima del valore del MTD.

$$EMTD \ (mm) = 0.79 \cdot MPD + 0.23$$

(1.5.2)

È spesso aggiunto a questo dispositivo anche un rilevatore GPS per facilitare la localizzazione dei diversi punti di prova. Gli standard che definiscono la prova si possono trovare nell' ASTM E1845

Un sistema automatico come il ROSANv fornisce una quantità maggiore di dati a costi inferiori e con minor rischio per gli operatori.
## CAPITOLO 2 – I fattori che influenzano l'aderenza in ambito stradale

#### 2.1 La presenza di acqua e l'altezza critica

La presenza di acqua sulla superficie della pavimentazione è il fattore che maggiormente influenza l'andamento dell'aderenza in ambito stradale. Nel Regno Unito più di un quarto degli incidenti che avvengono in condizioni di strade bagnate sono causati dallo slittamento dei pneumatici sulla pavimentazioni [2]. Un aumento del 10% della resistenza allo scivolamento può portare ad una riduzione degli incidenti, causati da slittamento, fino al 13%. Come mostrato in Figura 19 all' aumentare della profondità della macro-tessitura si riscontra una diminuzione delle probabilità di incidente.





È quindi importante conoscere l'interazione tra presenza di acqua e aderenza e il meccanismo che si sviluppa tra pneumatico e pavimentazione. Quando la pioggia diventa percettibile 0.1mm/h la superficie della pavimentazione risulta bagnata e si crea una membrana di acqua il cui spessore può variare da pochi micron a qualche millimetro. Questa pellicola di acqua agisce come un lubrificante, posizionandosi tra il pneumatico e la pavimentazione, e portando ad un'ovvia diminuzione dell'aderenza.

La capacità di drenaggio di una pavimentazione e quindi la diminuzione dello spessore della pellicola d'acqua è dovuta alle sporgenze della superficie e alla macro-tessitura. Anche la presenza

di vuoti all'interno della pavimentazione aiuta il drenaggio permettendo l'immagazzinamento, al di sotto della superficie di una parte della pioggia precipitata. Una parte del drenaggio viene riconosciuta anche al battistrada dei pneumatici che risulta però inadeguato ad assicurare una sufficiente aderenza ad alte velocità.

Come illustrato in Figura 20 la zona di contatto tra pneumatico e pavimentazione può essere divisa in tre sezioni [2]:

- A. Zona di affondamento (Sinkage Zone), dove non c'è contatto tra pavimentazione e pneumatico. Quest'ultimo galleggia su un sottile strato di acqua, il cui spessore decresce progressivamente man mano che l'acqua viene espulsa dalla pressione idrostatica che si crea al di sotto del pneumatico.
- B. Zona di transizione (Transition Zone), dove la membrana viene parzialmente interrotta dalle asperità di qualche aggregato. In questa zona si inizia a creare aderenza tra penumatico e pavimentazione a causa della micro-tessitura, degli aggregati scoperti, che entra in contatto con lo pneumatico.
- C. Zona di trazione o contatto (Tractive Zone), l'acqua viene completamente espulsa rendendo possibile il contatto completo tra pneumatico e pavimentazione. In questa zona tutta la micro-tessitura disponibile viene utilizzata per creare aderenza.



Figura 20 - Zona di contatto tra pneumatico e pavimentazione.

Le dimensioni di queste tre zone dipendono dallo spessore del film di acqua che ricopre la pavimentazione, il modello del battistrada e la sua profondità, la pressione del penumatico, le caratteristiche della macro-tessitura e la velocità di percorrenza del veicolo. All'aumentare della velocità il tempo disponibile per espellere l'acqua dall'interfaccia diminuisce e l'effetto lubrificante dall'acqua ha effetti sempre maggiori. Generalmente si considera che nella zona di affondamento tutta la micro-tessitura sia ricoperta da un film d'acqua mentre la macro-tessitura subisce una

riduzione di 0.3mm. Nella zona di transizione la micro-tessitura viene ridotta di 0.01mm e la macro-tessitura rimane invariata. Nella zona di trazione sia micro che macro-tessitura sono considerate totalmente attive.

Se la zona di contatto diventa nulla, si creano le condizioni per l'effetto dell'acquaplaning. Durante questo fenomeno la pellicola d'acqua tra pneumatico e pavimentazione non risulta interrotta, il veicolo slitta sull'acqua che impedisce qualsiasi contatto con la superficie della pavimentazione. Il coefficiente di attrito si riduce a 0,04 poiché l'acqua essendo un fluido non è capace di resistere a nessuna apprezzabile forza di taglio. La diminuzione di aderenza dovuta alla pavimentazione bagnata può variare dal 10 al 70%. Nel caso limite dell'acquaplaning, in cui un film d'acqua ricopra tutte le asperità, la diminuzione raggiunge anche il 95%.

L'influenza della profondità della pellicola d'acqua e la velocità di scorrimento sull'aderenza sono riportate in Figura 21. Si può affermare che l'aderenza, per una data velocità di scorrimento, sia funzione principalmente della micro-tessitura mentre velocità con cui varia dipenda più dalla macro-tessitura [2].





Al contrario di quanto si possa pensare i pericoli maggiori in ambito stradale non si riscontrano nel caso di acquaplaning, o comunque condizioni estreme in cui la strada risulta allagata, ma con strade solo apparentemente asciutte ma ricoperte da una pellicola d'acqua minore di 1mm. Basti pensare anche solo alla scarsa frequenza di eventi meteorici con portata maggiore di 10mm/h, limite minimo necessario per ritrovare la presenza di almeno 1mm di acqua sulla pavimentazione.

Uno studio importante sul variare dell'aderenza in presenza di profondità d'acqua minori di 1mm e sulla creazione di un modello capace di ben rappresentare questa dipendenza è stato effettuato dagli autori T. Do, V. Cerezo, Y. Beautru e M. Kane [3]. Sono stati effettuati test di aderenza su lastre create con un mosaico di aggregati di fiume grossolani immersi in una matrice resinosa. Sono state sabbiate le lastre con particelle di corindone di tre diametri diversi e effettuato un numero di passaggi diverso, che va da 1 a 3, in zone differenti come meglio illustrato in Figura 22.



**Figura 22** - Partendo da sinistra: particelle di corindone, strumento per la sabbiatura e le diverse zone del provino sottoposte ad un diverso numero di passaggi.

Sono state quindi create nove zone con micro-tessiture differenti oltre alla naturale liscezza degli aggregati di fiume che non hanno subito sabbiatura.

I diversi provini sono stati nominati con le seguente nomenclatura:

S590-EJ

Dove:

- 420, 590, 800 sono i diametri in micron delle particelle di corindone utilizzare;
- J può variare da 0 a 3 e indica il numero di passaggi effettuati.

I test di aderenza sono stati effettuati per mezzo di un Dynamic Friction Tester (DFT), un dispositivo di cui si è già parlato nel capitolo precedente.

I risultati dei test effettuati su S590-E0 e S590-E3 sono mostrati in Figura 23 e messi a confronto con l'andamento dell'aderenza per una pavimentazione in conglomerato bituminoso (E1) e uno cementizio (C). Si può riscontrare una buona corrispondenza tra i dati ottenuti in laboratorio e i rilievi effettuati in situ, il metodo utilizzato è adeguato a rappresentare l'andamento dell'aderenza in funzione della presenza di acqua e delle diverse micro-tessiture.

Come si può notare nel caso E3 sono presenti tre diverse frasi:

- 1. La prima fase detta di lubrificazione marginale (Boundary Lubrication BL) cui si mantiene sostanzialmente lo stesso valore di aderenza registrato nelle condizioni di asciutto;
- La seconda fase chiamata di lubrificazione mista (Mixed Lubrication ML) che inizia una volta raggiunta una profondità critica (Critical Water Depth) dove si riscontra una rapida diminuzione del coefficiente di aderenza;
- 3. La terza fase definita di lubrificazione elasto-idrodinamica (Elastohydrodynamic Lubrication EHL) in cui il coefficiente tende a stabilizzarsi nuovamente in questo tratto.



Figura 23 - Andamento dell'aderenza in funzione della profondità dell'acqua.



*Figura 24 - Effetto della micro-tessitura superficiale sulla curva aderenza-profondità d'acqua.* 

Dall'osservazione dei grafici in Figura 23, 24 e 25 si possono effettuare le seguente considerazioni:

- Nel caso del campione S590-E0 non si presenta la prima fase BL. Questo è spiegabile a causa della bassa micro-tessitura di questo campione (non sottoposto a sabbiatura) che porta ad una diminuzione immediata dell'aderenza appena sottoposto a bagnatura (Figura 23).
- Una maggiore aderenza in condizioni di asciutto per il campione S590-E0 rispetto al campione S590-E3. Il primo provino essendo più liscio e privo di asperità garantisce una superficie di contatto maggiore che influenza molto l'aderenza in condizioni di assenza di lubrificanti (Figura 23).
- La transizione tra fase di lubrificazione marginale e lubrificazione mista non coincide nei campioni con diversa micro-tessitura. Il punto di transizione si muove verso destra e la curva aderenza-profondità d'acqua si sposta verso l'alto all'aumentare della microtessitura (Figura 24 sinistra).
- L'effetto della micro-tessitura dipende dalla profondità d'acqua. La differenza di aderenza tra i diversi campioni si sviluppa nella fase ML e rimane costante nell'ultima fase EHL (Figura 24 destra).
- Il punto di transizione tra lubrificazione marginale e lubrificazione mista non coincide per provini con micro-tessitura diversi. La profondità critica che indica il passaggio da una fase all'altra dipende quindi dalla micro-tessitura.
- La profondità critica è determinabile dall'intersezione tra due linee Figura 25. La prima orizzontale calcolata come la media dei coefficienti misurati che non differiscono dal valore

di aderenza calcolato in condizioni di asciutto per più di 0.04 (la precisione della DFT) e la seconda che definisce il decadimento nel regime di lubrificazione misto ed ha una pendenza pari alla derivata della curva nel punto di inflessione (derivata seconda pari a zero).



Figura 25 - Individuazione della profondità critica dell'acqua.

Oltre a queste osservazioni sui meccanismi che regolano l'influenza della profondità d'acqua e della micro-tessitura sull'aderenza, gli autori hanno fornito un modello matematico per cercare di illustrare meglio come le asperità delle micro-tessitura possano generare aderenza anche quando in parte coperte da una pellicola d'acqua e per meglio definire il concetto di profondità critica d'acqua.

Il modello si basa su due meccanismi fondamentali:

- La generazione di aderenza;
- La copertura da parte dell'acqua della micro-tessitura.

Il modello per la generazione di aderenza si basa su un modello sviluppato dello stesso autore T. Do [4]. Si considera un cursore di gomma che scorre sopra un'asperità conica con un angolo al vertice pari a  $2\alpha$ , come mostrato in Figura 26.



Figura 26 - Illustrazione delle forze agenti su un cursore di gomma che si muove sopra un'asperità conica.

Considerando l'equilibrio sulla faccia ascendente e discendente è possibile ricavare le seguenti formule:

$$F_{xa} = \frac{F_{za}(\cos\alpha + \mu_0 \sin\alpha)}{\sin\alpha - \mu_0 \cos\alpha}$$
(2.1.1)

$$F_{xd} = \frac{F_{zd}(\mu_0 \sin \alpha - \cos \alpha)}{\sin \alpha + \mu_0 \cos \alpha}$$
(2.1.2)

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} = \frac{F_{xa} + f_{xd}}{F_z} = h \cdot \frac{\cos \alpha + \mu_0 \sin \alpha}{\sin \alpha - \mu_0 \cos \alpha} - (1 - h) \cdot \frac{\mu_0 \sin \alpha - \cos \alpha}{\sin \alpha + \mu_0 \cos \alpha}$$
(2.1.3)

$$h = \frac{F_{za}}{F_z} \tag{2.1.4}$$

Dove:

- $F_{\chi}$  e  $F_z$  sono rispettivamente le forze orizzontali e verticali;
- $F_{xa}$ ,  $F_{xd}$ ,  $F_{za}$ ,  $F_{zd}$  sono le componenti delle forze orizzontali e verticali sulla faccia ascendente e discendente;
- $2\alpha$  è l'angolo all'apice dell'asperità;
- $\mu$  è il coefficiente di aderenza;
- *h* è un fattore che definisce la distribuzione di *F<sub>z</sub>* sull'asperità, è stato adottato un valore di
   0.83 poiché il comportamento visco-elastico della gomma crea una deformazione asimmetrica con un sovraccarico sulla facciata ascendente.

Per quanto riguarda la modellazione dell'effetto di copertura delle asperità dovuto all'acqua questo viene semplicemente rappresentato da una linea orizzontale che trasla verticalmente quando la profondità aumenta, come mostrato in Figura 27 dalla linea tratteggiata.



Figura 27 - Rappresentazione del profilo degli aggregati e livello dell'acqua.

Le equazione utilizzate per calcolare un coefficiente di aderenza (2.1.8) dipendete dalla profondità d'acqua sono le seguenti [3]:

$$F_{x,def} = \sum_{N_i} F_{xi} = \sum_{N_i} \mu_i F_{zi}$$
(2.1.5)

$$F_{zi} = \frac{F_z}{N} \tag{2.1.6}$$

$$F_{x,def} = \frac{F_z}{N} \sum_{N_i} \mu_i \tag{2.1.7}$$

$$\mu_{def} = \frac{F_{x,def}}{F_z} = \frac{1}{N} \sum_{N_i} \mu_i$$
(2.1.8)

Dove:

- $\mu_{def}$  è la componente deformativa del coefficiente di aderenza;
- $F_z$  è il carico totale;
- $F_{xi}$ ,  $F_{zi}$ ,  $\mu_i$  sono la forza di attrito, il carico portato e il coefficiente di aderenza della iesima asperità;
- N e N<sub>i</sub> sono rispettivamente il numero totale delle asperità e il numero della asperità non coperte dalla pellicola d'acqua.

Con l'aumentare della profondità d'acqua sono una parte  $N_i < N$  di asperità sono in contatto con il cursore. Il modello ipotizza che ognuna delle asperità non sommerse sostenga ancora lo stesso carico  $F_{zi}$  che sosteneva in condizioni asciutte. Il coefficiente di aderenza  $\mu_i$  viene calcolato utilizzando la (2.1.3). I risultati del coefficiente di aderenza dovuto alla deformazione sono riportati in Figura 28. Viene utilizzata una altezza d'acqua fittizia WD\* per tracciare le curve perché non sono disponibili dati della quantità d'acqua che resta intrappolata tra superficie stradale e pneumatico.



Figura 28 - Andamento teorico dell'aderenza in funzione dell'altezza d'acqua.

Dalle curve in Figura 28 si possono ricavare due diverse considerazioni importanti per la validità del modello:

- Il valore finale dell'aderenza raggiunge lo zero, cosa che non accadeva invece nei test di laboratorio, come si può osservare confrontando questi risultati con quelli mostrati in Figura 24.
- 2. La differenza tra le due curve non è sufficientemente marcata.

Per cercare di sopperire a queste mancanze sono state aggiunte al modello dell'aderenza un addendo dovuto all'effetto dell'adesione, che non era stata considerata e che permette di rappresentare meglio l'influenza della macro-tessitura sull'aderenza, ed un valore dell'aderenza diverso da zero anche nella zona terminale di lubrificazione elasto-idrodinamica.

Per quanto riguarda la componente dovuta all'adesione sono state utilizzate le seguenti formule:

$$F_{x,adh} = \sum_{N_i} F_{xi,adh} = \sum_{N_i} \tau_i a_i \tag{2.1.9}$$

$$a_i = \pi r_i z_i \tag{2.1.10}$$

45

Dove:

- $F_{x,adh}$  la forza di attrito dovuta all'adesione;
- *F<sub>xi,adh</sub>*, *τ<sub>i</sub>*, *a<sub>i</sub>*, *r<sub>i</sub>*, *z<sub>i</sub>* che sono rispettivamente la forza di attrito dovuta all'adesione, sforzo di taglio, l'area di contatto, il raggio di curvatura della cima dell'asperità e la profondità di deformazione alla i-esima asperità.

Si ricava successivamente il coefficiente di aderenza dovuto all'adesione (2.1.11) da inserire nel modello, considerando lo sforzo di taglio  $\tau_i$  costante:

$$\mu_{adh} = \frac{F_{x,adh}}{F_z} = \frac{\pi\tau}{F_z} \sum_{N_i} r_i z_i$$
(2.1.11)

Introducendo un terzo addendo  $\mu_{hyd}$ , ricavato dai valori del coefficiente di aderenza residuo dei test di laboratorio e dovuto alla componente idrodinamica dell'aderenza si ottiene il seguente modello dato dalla somma delle tre diverse componenti (2.1.12):

$$\mu = \mu_{def} + \mu_{adh} + \mu_{hyd} \tag{2.1.12}$$

Per mezzo di una trasformazione matematica i valori della profondità d'acqua fittizia vengono convertiti nella profondità d'acqua utilizza per effettuare i test per mezzo di un fattore moltiplicativo  $\lambda$  calcolato per tentativi (2.1.13):

$$WD = \lambda \cdot WD^* \tag{2.1.13}$$

I risultati ottenuti nonostante la semplicità del modello e le diverse ipotesi aiutano a capire l'importanza del numero di asperità che rimangono a contatto con il pneumatico alle diverse profondità d'acqua. La diminuzione di aderenza è essenzialmente dovuta a questo effetto di ricoprimento da parte della pellicola d'acqua di una parte delle asperità della superficie stradale. Il modello ben si adatta ai risultati ottenuti dai test effettuati in laboratorio, come mostrato dalla comparazione in Figura 29, ed è quindi una valido strumento per rappresentare il variare del coefficiente di aderenza in presenza di acqua. In particolare si ottiene un ottimo riscontro di valori nelle fasi di lubrificazione mista ML e elasto-idrodinamica EHL mentre viene sovrastimato nella prima fase di lubrificazione marginale BL.



*Figura 29 - Comparazione tra le curve del coefficiente di aderenza calcolato con il modello e misurato in laboratorio.* 

### 2.2 Polishing

Le caratteristiche superficiali della pavimentazione stradale variano continuamente durante il ciclo di vita della pavimentazione in seguito alla continua abrasione delle asperità degli aggregati operata dal continuo passaggio di pneumatici e dalla presenza di detriti fini sulla strada. Questo fenomeno chiamato Polishing è influenzato dalla resistenza e durabilità degli aggregati che compongono il conglomerato. L'andamento tipico della aderenza è rappresentato in Figura 30, e in particolare la prima fase è quella che risulta influenzata dalla pulitura.



*Figura 30 –* Modello generale dell'evoluzione dell'aderenza nel tempo.

Il ruolo ricoperto dagli aggregati è duplice: da una parte le caratteristiche chimiche e mineralogiche dell'aggregato influenzano la micro-tessitura, dall'altra la curva granulometrica degli aggregati utilizzati condiziona la macro-tessitura.

Tourenq e Fourmaintraux hanno mostrato due diversi meccanismi per quanto riguarda la pulitura degli aggregati[5], mostrati in Figura 31:

- Una pulitura generale (General Polishing), che tende a smussare i bordi e le asperità degli aggregati più grossolani;
- Una pulitura differenziale (Differential Polishing), che tende a creare nuove asperità sugli aggregati.



Figura 31 - Meccanismi di pulitura degli aggregati: Generale e Differenziale.

La micro-tessitura evolve continuamente a causa della pulitura ma analizzando la composizione mineralogica di questi ultimi è possibile stimare se un aggregato è in grado di conservare o meno la propria micro-tessitura.

Sono stati studiati diversi metodi e macchine, analizzate meglio nel capitolo successivo, per cercare di studiare l'evoluzione dell'aderenza dovuta alla pulitura degli aggregati incorporati nel conglomerato.

Uno di questi pubblicato da M.Kane e altri nel 2013 aveva come scopo quello di scoprire le correlazioni tra aderenza a lungo termine e le proprietà mineralogiche di diversi aggregati [6].

È stata analizzata l'evoluzione dei coefficienti di aderenza a lungo termine di tre campioni composti solo da aggregati, incollati ad una piastra di prova per mezzo di una resina, e quattro diversi campioni di conglomerato:

- Campione di Greywacke: formato da aggregati di grovacca;
- Campione di Granite: costituito da aggregati granitici;
- Campione di Limestone: costituito da aggregati calcarei;
- Porous Asphalt Greywacke: Conglomerato bituminoso poroso con aggregati di grovacca;
- Stone Matrix Asphalt Granite: con aggregati granitici;
- AC10 Granite: conglomerato bituminoso di 10mm di spessore con aggregati granitici;
- AC10 Limestone: conglomerato bituminoso di 10mm di spessore con aggregati calcarei.

Sono stati ottenuti i risultati mostrati in Figura 32. Se osserviamo le curve dai quattro conglomerati possiamo notare come il coefficiente di aderenza cresca fino ad un massimo, che corrisponde con la rimozione del film di bitume che ricopre gli aggregati. La durata di questa fase dipende dal tipo di bitume e dalla capacità adesiva che ha sugli aggregati.



Figura 32 - Comparazione tra aggregati e conglomerati (a, b, c) e tra i tre tipi di aggregati (d).

La seconda fase consiste in una diminuzione del coefficiente di aderenza fino alla stabilizzazione. Questa diminuzione è dovuta alla pulizia degli aggregati non più protetti dalla membrana di bitume. L'evoluzione del coefficiente di aderenza in questa seconda fase è molto simile a quella dei singoli aggregati a prescindere dal mix design utilizzato. Si può affermare che a lungo termine l'aderenza dipende principalmente dalle caratteristiche degli aggregati. Per i campioni costituiti dai soli aggregati, Figura 32 (d), il coefficiente di aderenza decresce fino a stabilizzarsi. I valori maggiori sono quelli della grovacca mentre quelli dell'aggregato calcareo si stabilizzano a valori molto più bassi a causa della scarsa resistenza alla pulitura da parte di questa tipologia di aggregati.

Le analisi dei singoli aggregati confermano le teorie di Tourenq e Fourmaintraux [5] presentate precedentemente. Gli aggregati calcarei, costituiti da un singolo minerale con scarsa durezza, sono molto suscettibili alla pulitura e diventano quasi lisci raggiungendo i valori più bassi del coefficiente di aderenza. Al contrario la grovacca, composta da minerali con durezza differenti (quarzi, feldspati più resistenti, e biotite più morbido), è soggetta a pulitura differenziale. Viene mantenuto un buon valore del coefficiente di aderenza grazie alla rigenerazione della tessitura dovuta alla pulizia differenziale. Gli aggregati di granito mostrano un comportamento medio tra i due appena descritti.

Questi risultati sono stati ottenuti anche da altri studi, come quello pubblicato da M. M. Villani e altri, in cui è stata confermata la dipendenza del coefficiente di aderenza dalle caratteristiche mineralogiche del campione [7].

Da questo secondo studio sono ricavabili le seguenti informazioni:

- La macro-tessitura dipende, a parità di caratteristiche mineralogiche degli aggregati, dalla curva granulometrica utilizzata nel mix design. In particolare nel caso di conglomerati con maggior percentuale di aggregati a grana più grossolana si riscontrava un coefficiente di aderenza maggiore. Con l'aumento dell'azione pulente nel tempo le differenze tra i diversi conglomerati tendono a diminuire e a coincidere con i coefficienti di aderenza ottenuti dallo studio di campioni composti dai soli aggregati Figura 33 (a).
- A livello della micro-tessitura la struttura mineralogica influenza la propensione alla pulitura degli aggregati e i risultati ottenuti coincidono con quelli precedentemente presentati. Gli aggregati di grovacca subiscono la pulitura a ritmo più lento rispetto agli aggregati granitici. Figura 33.





I risultati mostrano come non sia sufficiente conoscere la sola componente mineralogica degli aggregati per caratterizzare le capacità di aderenza di conglomerati bituminosi durante la vitautile di una pavimentazione ma sia necessario considerare anche la granulometria utilizzata durante la fase di design.

#### 2.3 Temperatura e stagionalità

Le variazioni dell'aderenza a lungo termine sono principalmente dovuto a variazioni delle proprietà degli aggregati che compongono la pavimentazione, dovute alla pulizia causata dal traffico. Le variazione a breve termine, definite stagionali, sono dovute a piogge (trattate precedentemente nel paragrafo 2.1) e variazioni di temperatura. Sono stati effettuati diversi studi sull'importanza e le cause delle variazioni stagionali di aderenza. L'effetto della temperatura rimane uno dei fattori critici che merita di essere analizzato.

Gli effetti della temperatura sull'aderenza misurata possono essere suddivisi in tre diversi componenti:

- La temperatura dell'aria e dell'ambiente (ambient temperature, AT);
- La temperatura della pavimentazione (pavement temperature, PT);
- La temperatura del pneumatico (contained air temperature, CAT);

Risulta difficile controllare indipendentemente tutte e tre le temperature e i loro effetti in situ. Per questo motivo le misurazioni vengono effettuate in laboratorio dove è possibile tenere sotto controllo tutti i parametri.

Uno studio effettuato da K. Anupam e altri pubblicato nel 2012, ha analizzato gli effetti delle tre temperature, con tre diversi rapporti di scorrimento (Slip-Ratio) e su tre pavimentazioni differenti, sulla parte dell'aderenza dovuta all'isteresi sfruttando un modello termomeccanico a elementi finiti precedentemente convalidato per mezzo di risultati sperimentali ottenuti in laboratorio [8].

In questo studio la temperatura dell'aria (AT) e quella della pavimentazione (PT) sono state considerate indipendenti tra loro. Sono entrambe dipendenti da fattori come l'umidità, la presenza di vento e altri fattori ambientali e questo rende difficile stabilire una relazione generale tra AT e PT. Si sono esaminate diverse combinazioni con la temperatura dell'aria (AT) che è stata fatta variare da 0°C a 40°C mentre i valori della temperatura della pavimentazione sono stati fatti variare tra 0°C e 60°C. La temperatura del pneumatico è in generale più elevata della temperatura dell'aria ed è stata considerata per valori che vanno da AT+10°C a AT+20°C.

I tre rapporti di scorrimento analizzati sono stati 20%, 86% e 100%.

In tutti i casi analizzati, per temperature dell'aria e del pneumatico costanti, il coefficiente di aderenza dovuta all'isteresi decresce all'aumentare della temperatura della pavimentazione (PT)

come illustrato in Figura 34. Questa diminuzione implica un maggior rischio di insufficiente forza frenante su pavimentazioni con temperatura elevata. Per un aumento della temperatura della pavimentazione da 0°C a 60°C si ha una diminuzione del coefficiente di aderenza di 0.11 nel caso di conglomerato bituminoso poroso (Porous Asphalt). Con lo stesso aumento di temperatura della pavimentazione nel caso di Stone Mastic Asphalt (SMA) e di UltraThin Surface (UTS) si riscontra rispettivamente una diminuzione del coefficiente di aderenza di 0.19 e 0.13. Questo fatto può essere dovuto alla maggiore capacità di conduzione del SMA che porta a una temperatura più elevata del pneumatico e causa così una perdita maggiore della componente dovuta all'isteresi rispetto alle altre due tipologie di pavimentazione.



Figura 34 - Coefficiente di aderenza in funzione della PT con rapporto di scorrimento paria a 20%.

La stessa analisi è stata effettuata con rapporti di scorrimento pari a 86% e 100%. I risultati sono mostrati in Figura 35 e 36 e come nel caso precedente ad un aumento della temperatura della pavimentazione corrisponde una diminuzione del coefficiente di aderenza. La variazione riscontrata tra i rapporti di scorrimento pari a 86% e 100% è marginale.



Figura 35 - Coefficiente di aderenza in funzione della PT con rapporto di scorrimento paria a 86%.



Figura 36 - Coefficiente di aderenza in funzione della PT con rapporto di scorrimento paria a 100%.

Gli effetti di diverse temperature dell'aria (AT), comprese tra 0°C e 40°C, sul coefficiente di aderenza, sono illustrate in Figura 37, Figura 38 e Figura 39. Le curve mostrano come a temperature della pavimentazione (PT) e del pneumatico (CAT) costanti si riscontri sempre una diminuzione del coefficiente di aderenza con l'aumentare della temperatura dell'aria.

Se si raffrontano i risultati ottenuti per le tre diverse tipologie di pavimentazione (PA, SMA, UTS) e i tre rapporti di scorrimento differenti (20%, 86% e 100%) si può notare come la pendenza delle curve sia quasi costante. Si ottiene una diminuzione del coefficiente di aderenza dovuto all'isteresi di 0.08 per la PA, di 0.06 per la SMA e di 0.07 per la UTS. La variazione in funzione della temperatura dell'aria (AT) non viene quindi influenzata dal tipo di pavimentazione o dal rapporto di scorrimento.



Figura 37 - Coefficiente di aderenza in funzione della PT con rapporto di scorrimento paria a 20%.



Figura 38 - Coefficiente di aderenza in funzione della PT con rapporto di scorrimento paria a 86%.



Figura 39 - Coefficiente di aderenza in funzione della PT con rapporto di scorrimento paria a 100%.

Sono stati rilevati anche gli andamenti delle curve dei coefficienti di aderenza per temperature del pneumatico che variano tra 20°c e 20°c, con coefficienti di scorrimento pari a 20% e 86% e per le tre diverse tipologie di pavimentazione. Sono diversi i valori per le tre curve che rappresentano PA, SMA e UTS ma l'andamento e la pendenza risultano essere uguali. Come mostrato dalla Figura 40 a diminuzione del coefficiente di aderenza non risulta dipendente dal tipo di pavimentazione, che non influenza l'andamento ma solo il valore iniziale dell'intercetta delle curve con l'asse delle ordinate, o dal rapporto di scorrimento. La diminuzione del coefficiente di aderenza dovuto all'isteresi, con un aumento di 10°C della temperatura dell'aria, risulta pari a 0.05 per la PA, 0.02 per l'UTS e 0.05 per la SMA.



Figura 40 - Coefficiente di aderenza in funzione della CAT con rapporto di scorrimento pari a 20% (a) e 86% (b).

Le analisi di tutte queste differente casistiche hanno mostrato come temperature dell'aria (AT), della pavimentazione (PT) e del pneumatico (CAT) maggiori portino sempre ad una diminuzione del coefficiente di attrito dovuto all'isteresi. I risultati mostrano come delle tre superfici studiate quella costituita da conglomerato bituminoso poroso (Porous Asphalt, PA) sia quella con valori di aderenza più elevati. Questo è dovuto alla diversa macro-tessitura delle tre pavimentazioni, che risulta maggiore nel caso della PA e che porta ad una maggiore dissipazione di energia e quindi a un maggiore, coefficiente di aderenza dovuto all'isteresi.

Alle stesse conclusioni è giunto anche uno studio di M. A. Khasawneh e R. Y. Liang che affermano come ad un aumento di temperatura corrisponda sempre una diminuzione del coefficiente di aderenza [9]. Questa diminuzione viene attribuita ai cambiamenti nella rigidezza del conglomerato e del pneumatico all'aumentare della temperatura. A differenza dell'esperienza precedente, basata su un modello, in questo caso i risultati sono ottenuti da prove in laboratorio in cui diversi campioni sono stati sottoposti a tre differenti fasi di pulizia e per ogni fase è stato calcolato con il British Pendulum il BPN a diverse temperature del pneumatico (CAT), dell'aria (AT) e della pavimentazione.

# CAPITOLO 3 – La misura dell'aderenza in laboratorio e in situ

## 3.1 Il modello fisico

Sono molti i fattori fisici che influenzano l'aderenza ed esistono diversi test adatti a simulare separatamente i diversi fenomeni. Quello che mancava era un modello che attraverso un singolo test potesse ricreare l'intera evoluzione dell'aderenza nel tempo. In un articolo di M. T. Do e altri [10] viene trattata proprio la creazione di un modello che include i tre fattori principali che influenzano l'aderenza: la pulizia degli aggregati, la rimozione del binder e l'invecchiamento dovuto al clima. L'unico effetto che è stato trascurato, per mancanza di dati sufficienti, è l'alternanza delle stagioni e i suoi effetti sull'aderenza.

Sono state rilevate le caratteristiche di tre differenti siti, dalla loro costruzione, con cadenza semestrale. Per ogni sito sono stati considerati diversi campioni come mostrato nella Figura 41.



Figura 41 - Illustrazione dei campioni estratti dai diversi siti.

I test di laboratorio sono stati effettuati utilizzando il macchinario di Wehner-Schulze, che effettua sia la pulitura che la misurazione dell'aderenza e sarà trattata più nello specifico nel capitolo successivo.

Nelle analisi sono stati utilizzati i seguenti dati:

- Dai campioni estratti subito dopo la costruzione e utilizzati per i test di pulitura si ricavano:
  - 1.  $\mu$  il coefficiente di attrito;
  - 2. *N* il corrispondente numero di passaggi.
- Dai campioni estratti ogni sei mesi dalle corsie di scorrimento:
  - 1.  $\mu$  il coefficiente di attrito;
  - 2. RT il traffico espresso in passaggi di automezzi (Truck Passes).
- Dai campioni estratti ogni sei mesi dalla banchina:

1.  $\mu$  il coefficiente di attrito.

Osservando l'andamento del coefficiente di aderenza mostrato in Figura 42 si può notare che non è altro che la combinazione dell'aderenza fornita rispettivamente dagli aggregati nudi e da quelli ricoperti dal binder:

$$\mu = (1 - d)\mu_B + d\mu_G \tag{3.1.1}$$

Dove:

- d è la frazione di superficie occupata da aggregati nudi;
- μ<sub>G</sub> coefficiente di aderenza fornito dagli aggregati nudi;
- $\mu_B$  coefficiente di aderenza fornito dagli aggregati coperti dal binder.



Figura 42 - Andamento del coefficiente di aderenza in funzione del numero di passaggi.

La rimozione del binder dipende sia dal tempo sia dal traffico,  $\mu_G$  dipende unicamente dal numero di passaggi N e  $\mu_B$  varia solo in funzione del tempo. L'equazione precedente si può completare nel modo seguente:

$$\mu(t,N) = [(1 - d(t,N)]\mu_B(t) + d(t,N)\mu_G(N)$$
(3.1.2)

Dal grafico del coefficiente di aderenza µ in funzione del numero di passaggi N è possibile ricavare il modello di µ<sub>G</sub> adattandolo alla sola parte di grafico riguardante la diminuzione dell'aderenza come mostrato in Figura 43.

Il modello seguente si adatta bene alle misurazioni effettuate:

$$\mu_G = a(N+B)^c \tag{3.1.3}$$

0,7

0,6

0,5

0,4



*Figura 43 -* Modello del coefficiente  $\mu G$  adattato alle misurazioni.

Il coefficiente di aderenza fornito dagli aggregati ricoperti dal binder  $\mu_B$  viene invece espresso come la somma di due termini:

$$\mu_B = \mu_0 + \mu_V(t) \tag{3.1.4}$$

Dove:

0,7

0,6

0,5

0,4

- $\mu_0$  è il coefficiente ricavato dalle misurazioni dell'aderenza sulla strada di nuova • costruzione,
- $\mu_V$  rappresenta il guadagno in termini di aderenza, dovuto agli effetti climatici, in assenza di traffico.

L'andamento di  $\mu_V$  è modellizzato dalla seguente equazione:

$$\mu_V = \mu_1 \left[ 1 - e^{\left( -\frac{t}{t_0} \right)} \right]$$
(3.1.5)

Dove:

- μ<sub>1</sub> è il valore asintotico a cui tende μ<sub>V</sub>, o meglio il massimo valore di aumento di aderenza dovuto al clima,
- t<sub>0</sub> il valore dipende dal sito analizzato, i diversi valori ricavati variano poco tra loro, soprattutto in funzione della durata di vita della strada e viene quindi preso costante con un valore pari a 6 mesi.

La frazione di superficie occupata da aggregati nudi d viene espressa dalla seguente equazione, che ben si adatta ai dati ricavati dai diversi siti presi in esame come mostrato in Figura 44:



Figura 44 - Modello di "d" in funzione del numero di passaggi "N".

Sostituendo tutti i termini ricavati nell'equazione (3.1.1) si ottiene un modello fisico capace di descrivere l'evoluzione dell'aderenza (3.1.7):

$$\mu = e^{\left(-\frac{N}{N_0}\right)} \left[\mu_0 + \mu_1 \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{t_0}\right)}\right)\right] + \left(1 + e^{\left(-\frac{N}{N_0}\right)}\right) a(N+b)^c$$
(3.1.7)

Nonostante sembri una forma complessa tutti i parametri del modello possono essere ricavati da test di pulitura degli aggregati effettuati in laboratorio e dedotti dall'andamento dell'aderenza in funzione del numero di passaggi  $\mu - N$ .

La parte più innovativa di questo modello è che incorpora sia gli effetti della pulitura degli aggregati sia quelli dell'evoluzione dell'aderenza dovuti al clima, che fino a questo momento venivano trattati separatamente.

Il confronto dei risultati ottenuti con il modello e i dati ricavati dalle prove effettuate in sito mostra una buon buona corrispondenza come mostrato in Figura 45.



Figura 45 - Comparazione tra il modello e i dati ricavati in sito.

È inoltre interessante il poter valutare indipendentemente l'influenza di ogni fattore sull'evoluzione generale dell'aderenza.

#### 3.2 Simulare la pulitura degli aggregati in laboratorio

È importante in ambito stradale conoscere e prevedere come evolverà l'aderenza nel tempo in modo da creare un mix-design adatto alle esigenze e disporre con anticipo gli interventi di manutenzione. La maggior parte dei metodi di simulazione prevede la pulitura degli aggregati e, per i metodi che possono essere utilizzati per la valutazione dei conglomerati bituminosi, anche l'analisi della fase di rimozione del binder.

La simulazione della pulitura è stata sviluppata negli anni 50' dal Transport Research Laboratory (TRL) per quanto riguarda la pulitura degli aggregati. Questo metodo è ora conosciuto come PSV Test (Polished Stone Value Test) e non è adatto allo studio dei conglomerati a causa della forma curva dei campioni da analizzare.

La pulitura degli aggregati è dovuta all'attrito che si sviluppa tra superficie della pavimentazione e il pneumatico che scorre sopra di essa. Nel tempo sono state usate due diverse modalità per simulare questo contatto:

- L'attrito radente di un pattino in gomma che scivola sulla superficie;
- L'attrito volvente di ruote o supporti similari equipaggiati con pneumatici.

La prima modalità non riesce a riprodurre in modo adeguato la cinematica di un pneumatico che rotola sulla pavimentazione. In particolare tra pneumatico e la superficie si creano solo piccoli slittamenti, minori del 5%, dovuti principalmente alla deformazione del battistrada, mentre in questa modalità lo slittamento è pari al 100%.

Circa 30 anni fa è stata creata in Germania la macchina di Wehner-Schulze Figura 46. La macchina è composta da due testine, la prima per simulare la pulizia e la seconda per la misura dell'aderenza. I campioni sono circolari con un diametro di 22.5 cm. Possono esseri ricavati dalla superficie della pavimentazione o da lastre create appositamente in laboratorio. Possono essere testate anche campioni di resina circolari la cui superficie è composta da aggregati o sabbia.

L'azione pulente viene eseguita da tre coni di gomma, montati su un disco rotante, che rotolano sulla superficie del campione. La rotazione è pari a 500 giri/min che corrispondono ad una velocità lineare di 17 km/h. La pressione di contatto tra i coni e la superficie del provino è paria 0,4 N/mm<sup>2</sup> (per le autovetture leggere la pressione di gonfiaggio del pneumatico è circa 0,2 N/mm<sup>2</sup>).

64



**Figura 46 -** Macchina di Wehner-Schulze e particolari della testina di pulitura (sinistra) e testina per la misurazione dell'aderenza (destra).

Anche lo slittamento tra coni e campione è simile a quello che si avrebbe in condizioni reali tra ruota e pavimentazione ed è compreso tra lo 0.5% e l'1%.

Durante la rotazione una miscela di acque e polvere di quarzo viene spruzzata sul campione. La pulitura viene effettuata su una superficie di 6 cm di larghezza con un diametro di 16 cm Figura 47. La macchina può essere programmata per fermarsi dopo un certo numero prefissato di rotazione. Ad ogni interruzione viene spruzzata acqua e si effettuano 500 rotazioni per pulire il campione dai detriti.



*Figura 47 - Esempio di campioni sottoposti a pulitura con la macchina di Wehner-Schulze.* 

Dopo il lavaggio il campione viene manualmente spostato sotto la testina che effettua la misurazione dell'aderenza che è composta da tre piccoli cuscinetti in gomma, ognuno di 4 cm<sup>2</sup>, disposti a 120° l'uno dall'altro come si può notare dalla Figura 46.

La pressione di contatto tra i tre cuscinetti e la superficie del provino è circa 0.2 N/mm<sup>2</sup>. La testina viene fatta accelerare fino a quando non raggiunge una velocità tangenziale di 100 km/h. A 90 km/h viene proiettata acqua sulla superficie campione. Una volta raggiunti i 100 km/h il disco con i tra cuscinetti viene abbassato fino a quando non entra in contatto con il provino. La rotazione viene fermata dall'attrito che si sviluppa tra campione e cuscinetti e si ottiene una curva aderenza-tempo come quella mostrata in Figura 48. La procedura prevede di considerare il valore corrispondente a 60 km/h come coefficiente di aderenza.



Figura 48 - Esempio della curva di frenatura ottenuta dalla macchina di Wehner-Schulze.

L'università di Berlino adotta la seguente procedura di pulitura utilizzando la macchina di Wehner-Schulze [11]:

- Stato 0 Il campione nelle condizioni iniziali, non ancora sottoposto trattamento;
- Stato 1 Vengono effettuati 90000 passaggi della testina pulente sul provino;
- Stato 2 Viene praticato un irruvidimento superficiale per mezzo di sabbiatura;
- Stato 3 Il campione viene sottoposto ad altri 90000 passaggi della testina pulente;
- Stato 4 Si effettua la misura dell'aderenza e si ripete il passaggio precedente fino a quando dopo due passaggi successivi non si riscontra una differenza minore di 0.05.

Questa procedura è stata pensata per determinare l'aderenza minima prevista a lungo termine e risulta avere una buona corrispondenza con i valori di aderenza riscontrati in strade dopo 5-6 anni

[11]. Una campagna di misurazioni, portata avanti in Repubblica Ceca, ha confermato una buona capacità predittiva di questa prova confrontando i valori ottenuti in laboratorio effettuando la pulitura con la macchina di Wehner-Schulze e i dati raccolti sul campo [12]. Un aspetto interessante che non si può ricavare utilizzando la procedura dell'università di Berlino è l'evoluzione dell'aderenza nel tempo.

Per cercare di sopperire a questa mancanza è stata pensata una procedura differente che viene illustrata in un articolo pubblicato nel 2007 da M. T. Do [13]. L'obiettivo principale di questo studio era quello di trovare una nuova procedura da utilizzare con la macchina di Wehner-Schulze capace di analizzare l'andamento dell'aderenza nel tempo e mettere l'andamento della pulitura dei soli aggregati e dei conglomerati bituminosi cercando di capire se un'analisi dei primi fosse in grado di dare risultati soddisfacenti nel prevedere l'aderenza nel tempo.

Sono stati estratti campioni da tre differenti strade di nuova costruzione in modo da poter confrontare i risultati ottenuti in laboratorio con le misurazioni effettuate direttamente in situ con il passare del tempo.

Per ottenere una curva dell'evoluzione dell'aderenza i test di politura sono interrotti ad intervalli prefissati. Per tener meglio conto delle rapide variazioni nel periodo iniziale, i primi due anni di vita della pavimentazione, si interrompe la prova ogni 1000 rotazioni fino al raggiungimento della massima aderenza. Poi si effettuano le misurazioni ogni 30000 rotazioni fino ad un totale di 180000. Le curve ottenute simulando la pulitura in laboratorio per i tre diversi siti sono mostrati nella Figura 49. Si può riconoscere un andamento simile a quello dell'aderenza riscontrato in altri casi reali.



*Figura 49 -* Andamento delle curve dell'aderenza ottenute per i tre diversi siti in laboratorio.

L'autore ha poi confrontato direttamente queste curve con i risultati a sua disposizione ottenuti dalle misurazioni in situ. Al memento della pubblicazione erano disponibili sono i dati ottenuti dai primi due anni di rilevamenti in situ e sono stati confrontati con la parte di curve ottenute in laboratorio fino a 20000 passaggi di pulitura Figura 50.



Figura 50 - Confronto tra curve dell'aderenza simulate e misurazioni in situ.

I risultati del confronto, anche se illustrano solo l'iniziale sviluppo dell'aderenza, sembrano promettenti anche se necessitano di ulteriore validazione con la raccolta di nuovi dati dai diversi siti. A lungo termine i risultati del coefficiente di aderenza ricavato della macchina di Wehner-Schulze hanno già mostrato una buona corrispondenza con la minima aderenza a cui tende la superficie della pavimentazione (dopo circa 6 anni). È quindi plausibile ipotizzare una buona fedeltà anche dell'andamento delle curve ottenute in laboratorio con l'andamento dell'andamento registrato in situ tra i 2 e 6 anni.

Come detto precedentemente è stato effettuato anche un confronto tra l'evoluzione dei conglomerati e quella di campioni composti dai soli aggregati posizionati su una piastra ricoperta di resina per valutare l'influenza di questi ultimi sull'andamento dell'aderenza. I risultati ottenuti sono mostrati in Figura 51.



Figura 51 - Confronto tra l'evoluzione dell'aderenza di campioni di conglomerato e dischi composti da soli aggregati.

L'aderenza nel caso di aggregati privi di binder parte da un massimo e decresce con l'aumentare dei passaggi. La parte dei conglomerati, come abbiamo visto anche precedentemente, raggiunge un picco di massima rapidamente e poi inizia a decrescere. La cosa interessante che si può osservare è la buona corrispondenza tra le due curve dopo il punto di massimo raggiunto dall'aderenza nel conglomerato. Questo risultato si può spiegare perché una volta rimosso lo strato di binder superficiale anche il conglomerato si comporta sostanzialmente come gli aggregati che lo compongono e quindi che l'aderenza dopo la rimozione del binder è controllata dalla tipologia di aggregati. Successivamente a questi studi pubblicati nel 2007, altri autori hanno studiato la macchina di Wehner-Schulze e la sua applicazione. In particolare Dawai Wang e altri autori hanno cercato di valutare l'influenza dell'acqua e dell'agente di pulitura sui risultati dei test [14].

Si è notato che se l'agente di pulitura utilizzato differisce troppo come caratteristiche dalla composizione della polvere rinvenuta sulla superficie della pavimentazione in situ allora si può sovrastimare il coefficiente di aderenza calcolato in laboratorio. La polvere sulla strada è composta prevalentemente da Silice (60-80% della massa) che ha grani più grossolani della polvere di quarzo utilizzate come agente pulente nella macchina di Wehner-Schulze. Gli autori hanno utilizzato della sabbia di quarzo che ha granulometria più simile alla polvere raccolta in situ. I confronti tra i diversi risultati sono illustrati nel grafico e nella tabella di Figura 52.



Figura 52 - Confronto tra i risultati ottenuti utilizzando diversi agenti pulenti.

Si osserva che i risultati ottenuti tra il campione V2, che utilizza la polvere di quarzo solitamente utilizzata con la macchina di Wehner-Schulze, e il campione V3, più simile alla polvere che si recupera in situ, sono abbastanza differenti. Si ha un valore finale di aderenza  $\mu_{end}$  per V3 inferiore del 10% rispetto a V2. Il secondo confronto è stato fatto tra i test effettuati con presenza di acqua e in condizione asciutte. La differenza osservata tra i coefficienti di aderenza nelle due diverse condizioni è di 0.11 e 0.05 rispettivamente nel caso di polvere di quarzo e sabbia di quarzo come agenti pulenti. I risultati sono illustrati graficamente in Figura 53.



Figura 53 - Influenza dell'acqua sull'aderenza in funzione di diversi agenti pulenti.

Dai risultati di questa serie di esperimenti è stato accertato che:

- I test di laboratorio come la macchina di Wehner-Schulze possono essere un ottimo strumento di stima dell'aderenza ma solo se si tengono in considerazione le condizioni reali a cui è sottoposta la superficie stradale.
- L'utilizzo della polvere di quarzo nel test di Wehner-Schulze può portare a sovrastimare il reale coefficiente di aderenza.
- L'agente pulente è un fattore decisivo per la stima dell'aderenza a lungo termine. Se deve essere predetta realisticamente l'agente deve essere scelto con cura, in funzione della polvere rilevata sulla superficie stradale in situ e la sabbia di quarzo sembra risultare più adatta.

Quest'ultimo punto ha convinto gli autori ad utilizzare un differente dispositivo per studiare la pulizia degli aggregati poiché la macchina di Wehner-Schulze può riscontrare diversi problemi all'impianto di pompaggio e miscelazione a causa dell'utilizzo della sabbia di quarzo.

La macchina proposta è l'Aachen Polishing Machine (APM Figura 54) che a differenza di quella di Wehner-Schulze utilizza pneumatici di veicoli reali. In questa macchina due provini sono sottoposti a sforzi di taglio applicati da un movimento rotazionale e traslazionale. Il movimento traslazionale orizzontale è realizzato per mezzo di una slitta (Sled in inglese) sul quale sono fissate le due piastre di prova. Il movimento rotatorio è invece è dato da un asse verticale rotante a cui sono collegate due ruote a 55cm una dall'altra.

71


Figura 54 - L'Aachen Polishing Machine

La pressione dei pneumatici che effettuano la pulitura è pari a 0.2MPa e il carico a cui sono sottoposte è di 200 kg. La slitta si muove avanti e indietro per 9 volte in un minuto. Le rotazioni dell'asse verticale sono 41 ogni minuto. Grazie a questi due movimenti effettuati contemporaneamente tutto il provino subisce lo stesso effetto pulente a differenza dell'anello circolare su cui era effettuata la pulizia nella macchina di Wehner-Schulze. Durante il test viene proiettata acqua sulla superficie dei provini ( $27 \pm 7 g/min$ ). Dopo circa 300 minuti di test si raggiunge un equilibrio e cambia in maniera marginale se si continua l'azione di pulitura.

Si devono ancora effettuare dei test adeguati per assicurare la validità di questa nuova macchina soprattutto per quanto riguarda la simulazione della pulitura a lungo termine. I primi test per simulare la pulitura, effettuati su lastre di granito con l'Aachen Polishing Machine hanno mostrato ottimi risultati [15].

#### 3.3 Analisi delle immagini per ricavare la micro-tessitura in situ

Tutti i dispositivi che vengono utilizzati per calcolare l'aderenza della superficie di una pavimentazione sono basati sul rilevamento dell'attrito che si crea tra pneumatico e pavimentazione. Come visto nel Capitolo 1, in cui abbiamo parlato di strumenti per il calcolo dell'aderenza, vengono utilizzati dispositivi con ruote di prova che sono relativamente complessi e costosi. Nella maggior parte dei casi è necessaria la presenza di un mezzo che trasporta una cisterna per poter bagnare la superficie prima delle misurazioni limitando l'autonomia dei dispositivi. I rilevamenti effettuati sono dipendenti da quantità di acqua spruzzato sulla strada, temperatura, dalla velocità a cui viene effettuata la misurazione. Sono tutti fattori difficili da controllare e che influenzano la misura dell'aderenza.

Per questa ragione sono stati intrapresi molti sforzi per predire l'aderenza unicamente per mezzo di misurazioni ottiche della tessitura. I sensori ottici sono relativamente economici rispetto ai dispositivi che vengono, per il momento, utilizzati. Sono facili da combinare con altri dispositivi utilizzati per il monitoraggio, come quelli della tessitura, e sono indipendenti dalla presenza di acqua aumentandone di molto il range di utilizzo.

Nel passato sono stati effettuati diversi tentativi che non hanno ottenuto i risultati sperati, anche a causa di strumenti di misurazione della tessitura con risoluzioni non sufficienti e incapaci di catturare le caratteristiche geometriche che governano l'aderenza.

Le nuove tecniche che si stanno sviluppando sfruttano i laser o le immagini per ricavare la tessitura della pavimentazione. Sono diversi gli studi pubblicati negli ultimi anni in questi campi che stanno portando a buoni risultati, in particolare per quanto riguarda l'analisi della forma e tessitura degli aggregati [16-17].

Nel 2015 è stato pubblicato uno studio di A. Ueckermann e altri autori che non limitavano le loro ricerche al solo rilevamento della tessitura con strumenti ottici, ma per mezzo di un modello d'attrito della gomma (Rubber Friction Model) ricavare l'aderenza senza sfruttare strumenti di contatto. Il concetto di misurazione senza contatto si basa su questi due passaggi illustrati in Figura 55:

 Misurazione della tessitura della pavimentazione con l'utilizzo di sistema di rilevamento ottico;

73

• Calcolo dell'aderenza attraverso l'utilizzo di un modello d'attrito della gomma.



Figura 55 - Illustrazione concettuale della misurazione dell'aderenza senza contatto.

Per quanto riguarda il sensore ottico si è utilizzato un sensore di luce cromatica bianca (chromatic white light sensor) capace di una risoluzione verticale fino a 20nm e una orizzontale di 1µm.

Il modello matematico utilizzato per quantificare il coefficiente di aderenza è quello di Persson che permette di calcolare il coefficiente di aderenza di una gomma che scivola contro un substrato duro e ruvido. Questo modello necessita di dati quali il modulo di Young, il coefficiente di Poisson, la pressione di contatto, la velocità di scorrimento e la temperatura. Le capacità predittive dell'aderenza di questo modello sono state valutate comparando i risultati per mezzo di esperimenti e rilievi diretti.

Di seguito vengono raccolte le equazioni utilizzate dal modello di Persson [18]:

$$\mu_{k} = \frac{1}{2} \int_{q_{L}}^{q_{1}} q^{3} C(q) P(q) dq \int_{0}^{2\pi} \cos(\phi) Im\left(\frac{E(qv\cos(\phi))}{(1-v^{2})\sigma_{0}}\right) d\phi$$
(3.3.1)

$$P(q) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin(x)}{x} e^{(-x^2 G(q))} dx$$
(3.3.2)

$$G(q) = \frac{1}{8} \int_{q_L}^{q} q^3 C(q) dq \int_0^{2\pi} \left| \frac{E(qv\cos(\phi))}{(1-v^2)\sigma_0} \right|^2 d\phi$$
(3.3.3)

$$C(q) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int h(x)h(0)e^{-iqx}d^2x$$
(3.3.4)

$$q = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{3.3.5}$$

### Dove:

- *q* è la frequenza spaziale;
- P(q) è la funzione dell'area di contatto;
- C(q) è la funzione di densità spettrale (PSD) bidimensionale della pavimentazione;
- E e v sono rispettivamente il modulo di Young e il coefficiente di Poisson;
- $\Phi$  è l'angolo che si forma tra la direzione di scorrimento e il vettore d'onda;
- $\sigma_0$  è la pressione di contatto.

Per una più completa trattazione di questo modello si può fare riferimento agli articoli pubblicati da Bo N. J. Persson [19-20].

Per validare questo metodo e il modello di Persson utilizzato si sfrutta l'analisi effettuata in laboratorio con la macchina di Wehner-Schulze di cui si parla precedentemente in questo stesso capitolo. Sono stati studiati 33 campioni differenti:

- 13 campioni ricavati da lastre di calcestruzzo create in laboratorio con aggregati di diametro differente (tra 8 e 11mm) e soggetti a diverse fasi di pulitura;
- 19 campioni di conglomerati bituminosi estratti direttamente dalla superficie di pavimentazioni esistenti con aggregati compresi tra gli 8 e gli 11mm;
- 1 campione di Stone Matrix Asphalt.

Per ogni tipologia studiata sono stati creati dai due ai quattro campioni per poter ottenere una media dei risultati attendibile. La pulitura è stata effettuata utilizzando l'Aachen Polishing Machine, la cui validità nel simulare la pulitura è già stata mostrata precedentemente.

I valori dell'aderenza ottenuti per via teorica e dai diversi test di laboratorio sono elencati nella Tabella 1.

Tabella 1 - Campioni di superfici testati con la macchina di WS per la compa
--

Numero Provino	μ Misurata	μ Teorica	Quantità	Dettagli
1	0.43	0.42	2	Calcestruzzo con aggregati a esposti, stato iniziale
2	0.62	0.61	2	Calcestruzzo con aggregati esposti, sabbiato
3	0.42	0.44	2	Calcestruzzo con aggregati esposti, pulitura 1
4	0.43	0.41	2	Calcestruzzo con aggregati esposti, pulitura 2
5	0.45	0.44	2	Calcestruzzo con aggregati a esposti, stato iniziale
6	0.64	0.64	2	Calcestruzzo con aggregati esposti, sabbiato
7	0.47	0.47	2	Calcestruzzo con aggregati esposti, pulitura 1
8	0.45	0.48	2	Calcestruzzo con aggregati esposti, pulitura 2
9	0.36	0.31	2	Calcestruzzo con aggregati a esposti, stato iniziale
10	0.53	0.52	2	Calcestruzzo con aggregati esposti, sabbiato
11	0.32	0.34	2	Calcestruzzo con aggregati esposti, pulitura 1
12	0.37	0.38	2	Calcestruzzo con aggregati esposti, pulitura 2
13	0.24	0.25	4	CB, Aachen, Goethenstrasse 13
14	0.20	0.22	2	CB, Aachen, Boxgraben 22, stato iniziale
15	0.18	0.17	2	CB, Aachen, Boxgraben 22, pulitura 1
16	0.19	0.20	2	CB, Aachen, Boxgraben 22, pulitura 2
17	0.17	0.20	4	CB, Aachen, Lutticher Strasse 21
18	0.30	0.28	1	CB, Aachen, Wallstrasse 57
19	0.30	0.29	2	CB, Aachen, Lutticher Strasse 56, corsia destra
20	0.24	0.23	4	CB, Aachen, Lutticher Strasse 56, corsia sinistra
21	0.28	0.28	1	CB, Aachen, Boxgraben 32
22	0.28	0.28	1	CB, Aachen, Lutticher Strasse 21, corsia ciclabile
23	0.33	0.35	3	CB, Aachen, Rud. Ring
24	0.50	0.55	3	CB, Aachen, Rud. Ring, zona adiacente
25	0.36	0.38	1	CB, Aachen, Madrider Ring
26	0.30	0.27	2	Stone matrix asphalt, Eschweiler 36
27	0.28	0.26	1	CB, Aachen, parcheggio, aggregati grossolani
28	0.31	0.29	2	CB, Aachen, parcheggio, aggregati fini
29	0.32	0.30	2	CB, Aachen, parcheggio
30	0.36	0.35	2	CB, Aachen, parcheggio
31	0.33	0.34	2	CB, Aachen, parcheggio
32	0.35	0.33	1	CB, Aachen, Schleidener Strasse
33	0.46	0.47	4	Calcestruzzo con aggregati esposti

Si può notare una buona corrispondenza tra i valori calcolati teoricamente e quelli ottenuti dal test di Wehner-Schulze. Il coefficiente di determinazione è pari a  $R^2 = 0,97$  e indica che il modello riesce bene a spiegare i dati, come si può notare anche graficamente dall'immagine 56.



Figura 56 -Comparazione tra dati misurati e calcolati per mezzo del modello.

I risultati di questo studio sono molto promettenti e indicano un possibile calcolo dell'aderenza senza la necessità del contatto con la pavimentazione nel futuro. Il passaggio successivo consiste nell'adattare questo metodo di misurazione ai rilievi in situ. In particolare la creazione di un sensore ottico in grado di effettuare misurazioni estensive sulla strada [18].

Un aiuto ci arriva dall'analisi delle immagini per mezzo della tecnica di stereo-visione fotometrica che ha fornito buoni risultati e possibili strumenti in laboratorio ma che necessita di una riduzione delle dimensioni e un adattamento per rendere possibili le misurazioni a bordo di un autoveicolo [17].

# CAPITOLO 4 – Indici per la valutazione dell'aderenza

### 4.1 Skid Number

Lo Skid Number (SN), chiamato anche Friction Number (FN), si ottiene utilizzando i dispositivi di prova a ruota bloccata conformi con quanto prescritto nell'ASTM E 274. Rappresenta il coefficiente medio di aderenza misurato durante un intervallo di prova. Viene calcolato con la seguente equazione:

$$SN(V) = 100 \times \mu = 100 \times \left(\frac{F}{W}\right)$$

Dove:

- V, velocità del pneumatico di prova;
- *μ*, il coefficiente di aderenza;
- F, forza di trazione applicata allo pneumatico;
- W, carico verticale applicato allo pneumatico.

Il range dei valori che può assumere lo Skid Number varia da 0, quando non c'è alcuna aderenza, a 100 per l'aderenza completa.

I valori sono generalmente correlati alla velocità a cui è stato effettuato il test e dal tipo di pneumatico utilizzato. Di seguito sono riportati due esempi di come può essere indicato lo Skid Number in base alla velocità di prova e alle caratteristiche del pneumatico:

$$SN50R = 39$$
$$SN40S = 26$$

Dove:

- 50 e 40 indicano la velocità di prova in  $\frac{mi}{h}$ ;
- R è la sigla per Ribbed, che indica uno pneumatico con battistrada;
- S è l'abbreviazione di Smooth, che indica uno pneumatico liscio;
- 39 e 26 sono i diversi valori ottenuti con le due differenti condizioni di test.

#### **4.2 International Friction Index**

Nel 1992 la PIARC, l'associazione mondiale della strada, ha sponsorizzato una ricerca internazionale sull'aderenza a cui hanno partecipato rappresentanti di 16 diverse nazionalità. L'esperimento fu condotto in 54 siti, sparsi tra gli Stati Uniti e l'Europa, e che comprendeva 51 sistemi di misurazione diversi. Furono valutati diversi tipi di strumentazione utilizzati per i test dell'aderenza, tra cui il British Pendulum, a ruota bloccata (locked-wheel), a scorrimento fisso (fixed-slip), ABS, a scorrimento variabile (variable-slip), forza trasversale (side-force) e altri prototipi. La tessitura della superficie fu misurata per mezzo di profilometri laser, test dell'altezza in sabbia e outflow meters.

Il risultato principale di questa ricerca è stato lo sviluppo dell'International Friction Index (IFI). L'IFI ha standardizzato il modo di riportare l'aderenza in funzione della velocità di scorrimento dello pneumatico.

Trattandosi di una misura dell'aderenza che dipende fortemente dalla velocità di scorrimento dello pneumatico, i valori dell'aderenza misurati per valori inferiori e superiori a  $60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  sono espressi come valori di un modello esponenziale in funzione dello Speed Number (S<sub>P</sub>) che può essere valutato per velocità comprese tra  $1 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  e i  $500 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ .

La ricerca della PIARC conferma che  $S_P$  è la misura dell'influenza della macro-tessitura sull'aderenza.

L'IFI è composto da due diversi numeri e viene indicato nel seguente modo:

$$IFI(F(60), S_P)$$

Questo indice è basato su un modello matematico che rappresenta il coefficiente di aderenza in funzione della velocità di scorrimento e della macro-tessitura.

Lo Speed Number e il Friction Number sono calcolati usando le seguenti equazioni:

$$S_p = a + b \times TX$$

Dove:

• S<sub>P</sub> è l'IFI Speed Number,

- a e b sono costanti di calibrazione che dipendono dal metodo utilizzato per calcolare la marco-tessitura. Per MPD (profondità media del profilo) i valori da usare sono a = 14.2 e b = 89.7. Per MTD (profondità media della tessitura si utilizzano invece a = -11.6 e b = 113.6,
- TX è la misura della macro-tessitura in mm (MPD o MTD).

$$FR(60) = FR(S) \times e^{\left(\frac{S-60}{S_P}\right)}$$

Dove:

- FR(60) è il valore dell'aderenza calcolato ad una velocità di scorrimento di  $60 \frac{km}{h}$ ,
- *FR*(*S*) è il valore dell'aderenza alla velocità S,
- *S* è la velocità di scorrimento in  $\frac{km}{h}$ .

$$F(60) = A + B \times FR(60) + C \times TX$$

Dove:

- F(60) è il Friction Number dell'IFI,
- A e B sono costanti che dipendono dal metodo di misura utilizzato per ricavare l'aderenza,
- *C* è una costante di calibrazione richiesta per le misure effettuate utilizzando uno pneumatico scolpito.

È possibile valutare l'aderenza a qualsiasi velocità attraverso l'IFI come mostrato nella Figura 57. Una volta rilevato  $S_P$  e il valore dell'aderenza F(60) a  $60\frac{km}{h}$ , si può ricavare il valore dell'aderenza per ogni altro valore della velocità di scorrimento S. La curva dell'aderenza è tracciata utilizzando l'equazione precedente e F(60) e  $S_P$  sono indicati sul grafico.



Figura 57 - Rappresentazione dell'aderenza secondo il modello IFI.

L'indice S<sub>P</sub> della pavimentazione può essere misurato per mezzo di un dispositivo che valuta la macro-tessitura.

L'IFI rappresenta l'aderenza sperimentata da un guidatore nel caso di una frenata di emergenza, senza l'utilizzo dell'ABS. Al contrario il modello che tratteremo di seguito, chiamato Rado model, descrive l'aderenza in frenata nel caso di veicoli dotati di ABS.

#### 4.3 Rado IFI

Per valutare l'azione dei freni, in veicoli dotati di ABS, è necessario ricavare il valore massimo di aderenza quando la ruota sta ancora rotolando con bassi coefficienti di slittamento. Sotto queste condizioni lo pneumatico opererà sia per consentire di controllare la direzione del veicolo sia di effettuare la frenata. Nel caso di ruota bloccata, lo pneumatico non è in grado di fornire controllo direzionale al veicolo.

Il modello di aderenza Rado è stato sviluppato per completare il modello PIARC rappresentando l'andamento del valore massimo di aderenza. Questo modello è espresso nella seguente forma:

$$\mu(S) = \mu_{max} \times e^{-\left(\frac{\ln\left(\frac{S}{S_{max}}\right)}{\hat{c}}\right)^2}$$

Dove:

- $\mu_{max}$  è il valore massimo di aderenza, dipende dalle proprietà della superficie e dello pneumatico,
- S<sub>max</sub> è la velocità di slittamento per cui si ottiene il massimo valore di aderenza, conosciuta anche come velocità critica di slittamento,
- Ĉ è un parametro di forma che determina la forma asimmetrica della curva dell'aderenza come mostrato nella Figura 58.



Figura 58 - Confronto tra i modelli di aderenza IFI e Rado IFI.

Il modello RADO si presta a determinare la curva dell'aderenza per un processo di frenata che inizia con il libero rotolamento e termina nello stato di ruota bloccata. I dispositivi di misurazione dell'aderenza longitudinale a scorrimento variabile possono sfruttare questo modello per caratterizzare le loro misurazioni con tre parametri che descrivono totalmente l'intera evoluzione dell'aderenza ( $\mu_{max}$ ,  $S_{max}$ ,  $\hat{C}$ ). Utilizzando differenti procedure matematiche, questi tre parametri possono essere ricavati dai dati misurati. Si riducono così le centinaia di punti ottenuti dalle misurazioni, che costituiscono la curva dell'aderenza, alla misurazioni di soli tre numeri che insieme con la formula matematica possono ricreare l'intera curva dell'aderenza.

Vengono effettuate frenature controllate sullo pneumatico di misura, mentre viene mantenuta costante la velocità di marcia. La ruota su cui viene effettuata la misurazione viene gradualmente

portata da una condizione di rotolamento libero a una di ruota bloccata, attraverso le diverse velocità di slittamento.

Campionando centinaia di valori di aderenza per velocità di scivolamento conosciute, viene costruita una curva del Friction Number in funzione dei punti acquisiti. L'equazione della curva del Friction Number è stata determinata e viene ricavato anche il valore massimo di aderenza. Utilizzando le equazioni si possono stimare i valori di aderenza per qualsiasi velocità di scorrimento nel caso delle stesse condizioni ambientali.

#### 4.4 Correlazioni tra i diversi indici

Sono stati effettuati diversi studi per correlare le diverse tecniche di misurazione dell'aderenza e della tessitura. Queste correlazioni possono aiutare a capire come micro-tessitura e macro-tessitura possono influenzare l'aderenza. Di seguito verranno trattate alcune delle relazioni più importanti.

#### 4.4.1 La macro-tessitura

Gli indici utilizzati per caratterizzare la macro-tessitura sono il MTD e MPD. Nell'esperimento internazionale PIARC è stato illustrato come il parametro migliore per ricavare lo Speed Number per il calcolo dell'IFI sia l'MTD. Per consentire le conversioni di entrambi questi indici della macro-tessitura sono state sviluppate le seguenti relazioni matematiche [1]. Vengono proposte le formule sia per il sistema internazionale sia per il sistema imperiale britannico.

Per stimare l'indice MTD da misurazioni dell'indice MPD del profilo (ASTM E 1845):

 $EMTD (Estimated MTD)(in) = 0.79 \cdot MPD + 0.009 \tag{4.4.1}$ 

$$EMTD (Estimated MTD)(mm) = 0.79 \cdot MPD + 0.23 \tag{4.4.2}$$

Per stimare l'indice MTD da misure dell'indice MPD ottenute dal CTM (Circular Texture Meter) (ASTM E 2157):

$$EMTD(in) = 0.947 \cdot MPD + 0.0027 \tag{4.4.3}$$

 $EMTD (mm) = 0.947 \cdot MPD + 0.069 \tag{4.4.4}$ 

Per stimare l'indice MTD da misure ottenute con l'outflow meter (ASTM E 2380):

$$EMTD(in) = 0.123/OFT + 0.026 \tag{4.4.5}$$

EMTD(mm) = 3.114/OFT + 0.656 (4.4.6)

#### 4.4.2 L'aderenza

É possibile ricavare il Friction Number dalla misura della micro-tessitura e macro-tessitura, utilizzando una combinazione di penumatici lisci (Smooth ASTM E 524) e con battistrada (Ribbed ASTM E 501). Le seguenti equazioni sono basate su una misura della macro-tessitura effettuata per mezzo dell'altezza in sabbia SPM (ASTM E 965) e come surrogato della micro-tessitura il British Pendulum Number BPN (ASTM E 303). L'IFI ha fornito un metodo sfruttando le seguenti formule:

$$BPN = 20 + 0.405 \cdot FN40R + 0.039 \cdot FN40S \tag{4.4.7}$$

$$MTD = 0.039 - 0.0029 \cdot FN40R + FN40S \tag{4.4.8}$$

Dove:

- FN40R è il Friction Number calcolato utilizzando un pneumatico con battistrada alla velocità di  $40\frac{mi}{h}$ ;
- FN40S è il Friction Number calcolato utilizzando un pneumatico liscio alla velocità di  $40\frac{m}{h}$ .

Si può osservare come il valore BPN (rappresentativo della micro-tessitura) sia dipendente per ordine di grandezza maggiore dal FN calcolato con il pneumatico con battistrada rispetto a quello liscio. Da una serie di dati raccolti dal NASA Wallops Friction Workshop (oltre 400 misurazioni) è stata sviluppata la seguente relazione con un coefficiente di determinazione pari a  $R^2 = 0.86$  [1]:

$$FN40R = 1.19 \cdot FN40S - 13.3 \cdot MTD + 13.3 \tag{4.4.9}$$

Sfruttando la precedente relazione (4.4.9) è possibile ricavare, avendo già calcolato il Friction Number con pneumatico liscio e misurato la macro-tessitura per ricavare l'IFI, il valore di FN40Rsenza bisogno di effettuare nuove misurazioni.

L'equazione che permette di ricavare il valore di FN40R, in funzione di FN40S e dell'indice MPD è la seguente:

$$FN40R = 0.735 \cdot FN40S - 1.78 \cdot MPD + 32.9 \tag{4.4.10}$$

Raramente il BPN viene utilizzato come indice per rappresentare la micro-tessitura, per questo motivo sono state sviluppate anche delle correlazioni tra Friction Number, DFT(20) (Dynamic Friction Tester) e CTM (Circular Texture Meter) che vengono più spesso utilizzati:

 $FNS = 15.5 \cdot MPD + 42.6 \cdot DFT(20) - 3.1 \tag{4.4.11}$ 

 $FNR = 4.67 \cdot MPD + 27.1 \cdot DFT(20) + 32.8 \tag{4.4.12}$ 

# Conclusioni

L'aderenza in ambito stradale è un argomento molto vasto e molto diversi sono anche i fattori che la influenzano. In questo elaborato sono stati presi in analisi i fattori più importanti che portano le maggiori variazioni nel coefficiente di aderenza.

Un ruolo di primo piano è ricoperto dalla presenza di acqua e in particolar modo dal raggiungimento dell'altezza d'acqua critica. Si possono rilevare diminuzioni del coefficiente di aderenza dal 50-70%, con picchi del 95% nel caso in cui si raggiungano le condizioni che portano la vettura all'acquaplaning. Si tratta di condizioni estreme che risultano limitate nel tempo ad eventi metereologici particolarmente gravosi.

A lungo termine il fattore che influenza maggiormente la decrescita dell'aderenza è la pulitura degli aggregati che dipende dalle caratteristiche mineralogiche degli aggregati stessi, dalla curva granulometrica e dalle diversi tipologie di aggregati utilizzati. Dopo un iniziale aumento dovuto all'eliminazione dello strato di binder, che ricopre la superficie degli aggregati, si riscontra una continua diminuzione del coefficiente di aderenza fino al raggiungimento di una fase di equilibrio.

Nell'ultima fase di equilibrio si registrano delle variazioni periodiche dell'aderenza causate dalla stagionalità e dal variare delle temperature che influenzano il meccanismo dell'isteresi. In particolare a temperature maggiori corrispondono coefficienti di aderenza più bassi.

Nella seconda parte di questa tesi sono state presentate, e ne è stata mostrata la validità, la macchina di Wehner-Schulze e la Aachen Polishing Machine e le procedure adatte per simulare correttamente con queste macchine la pulitura degli aggregati.

In seguito è stata prestata attenzione all'analisi delle immagini, una nuova tecnica che permette di misurare l'aderenza, senza necessità di contatto tra strumento di misura e superficie della pavimentazione.

Questo è possibile grazie ad un modello matematico, capace di simulare il contatto tra pneumatico e pavimentazione e ai rilievi della tessitura effettuati per mezzo di un sensore ottico. Con questa tecnica si stanno ottenendo buoni risultati in laboratorio ma ancora non è stato creato un dispositivo portatile che possa di utilizzare questa tecnica in situ.

86

L'ultimo capitolo riguarda le diverse unità di misura, la loro storia e le equazioni che permettono di correlarle tra loro. In particolare sono mostrate diverse equazioni che legano indici rappresentativi dell'aderenza con indici che esprimono la tessitura.

## **Bibliografia**

[1] Guide for pavement friction, NCHRP Web-Only document 108, 2009

[2] Alexandros G. Kokkalis, Olympia K. Panagouli, Fractal Evalutation of Pavement Skid Resistance Variations [I]: Surface Wetting, Chaos Solitons & Fractals 9, 1998

[3] M. T. Do, V. Cerezo, Y. Beautru e M. Kane, Modeling of the connection road surface microtexture/water depth/friction, Wear 302, 2013, doi: 10.1016/j.wear.2013.01.031

[4] M. T. Do, Contribution of Road-Texture Scales to Pavement Skid-Resistance, Report no LPC-ER-CR 04-35, 2004

[5] M. T. Do, Z. Tang, M. Kane, F. de Larrard, Evolution of road-surface skid-resistance and texture due to polishing, Wear 266, 2009, doi: 10.1016/j.wear.2008.04.060

[6] Malal Kane, Ignacio Artamendi, Tom Scarpas, Long-term skid resistance of asphalt surfacings: Correlation between Wehner-Schulze friction values and the mineralogical composition of the aggregates, Wear 303, 2013, doi: 10.1016/j.wear.2013.03.22

[7] M. M. Villani, A. Scarpas, A. de Bondt, R. Khedoe, I. Artamendi, Application of fractal analysis for measuring the effects of rubber polishing on the friction of asphalt concrete mixtures, Wear 320, 2014, doi: 10.1016/j.wear.2014.08.013

[8] K. Anupam, S. K. Srirangam, A. Scarpas, C. Kasbergen, Influence of temperature on tirepavement friction, Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board 2369, 2014, doi: 10.3141/2369-13

[9] Mohammad Ali Khasawneh, Robert Y. Liang, Temperature Effect on Frictional Properties of HMA at Different Polishing Stages, Jordan Journal of Civil Engineering 6, 2012

[10] M. T. Do, M. Kane, Z. Tang e F. de Larrard, Physical model for the prediction of pavement polishing, Wear 267, 2008, doi: 10.1016/j.wear.2008.11.012

[11] S. Huschek, Experience with skid resistance prediction based on traffic simulation, Proceedings of the 5th International Symposium on Pavement Surface Characteristics, 2004

[12] Jaroslava Daskova, Jan Kudrna, The experience with Wehner/Schulze procedure in the Czech Republic, Procedia –Social and Behavioral Sciencies 53, 2012, doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.953

[13] M. T. Do, Zhenzhong Tang, Malal Kane, Francois de Larrard, Pavement polishing – Development of a dedicated laboratory test and its correlation with road results, Wear 263, 2007, doi:10.1016/j.wear.2006.12.086

[14] Dawei Wang, Xianhua Chen, Markus Oeser, Helge Stanjek, Bernhard Steinauer, Influence of different polishing conditions on the skid resistance development of asphalt surface, Wear 308, 2013, doi:10.1016/j.wear.2013.09.013

[15] Dawei Wang, Xianhua Chen, Markus Oeser, Helge Stanjek, Bernhard Steinauer, Study of micro-texture and skid resistance change of granite slabs during the polishing with the Aachen Polishing Machine, Wear 318, 2014, doi: 10.1016/j.wear.2014.06.005

[16] Taleb Al-Rousan, Eyad Masad, Erol Tutumluer, Tongyan Pan, Evalutation of image analysus techniques for quantifying aggregate shape characteristics, Construction and Building Materials 21, 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.03.005

[17] Anis Ben Slimane, Majdi Khoudier, Jaques Brochard, Minh-Tan Do, Characterization of road microtexture by means of image analysis, Wear 264, 2008, doi: 10.1016/j.wear.2006.08.045

[18] Andreas Ueckermann, Dawei Wank, Markus Oeser, Bernhard Steinauer, Calculation of skid resistance from texture measurements, Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, doi: 10.1016/j.jtte.2015.01.001

[19] B. N. J. Persson, Theory of rubber friction and contact mechanics, The Journal of Chemical Physics 115, 2001

[20] B. N. J. Persson, Theory of rubber friction, contact mechanics and the role of surface roughness on the adhesion of elastic solids, 160th Meeting of the Rubber Division, 2001

89