

# DALLA FIRMA VIBRO-ACUSTICA ALLE STRADE INTELLIGENTI

Rosario Fedele

Dipartimento DIIES, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Via Graziella, Feo di Vito - 89122, Reggio Calabria, Italia  
rosario.fedele@unirc.it

## Abstract

Road infrastructure monitoring and maintenance need to be improved to satisfy the requirements of the smart cities. This study aims at presenting a solution that can make smarter the management of the roads of the future. The methodology used to carry out this study consisted of an experimental investigation carried out on an asphalt concrete road pavement tested in different structural conditions (holes are drilled to simulate the presence and the propagation of cracks). Loads were generated using a car, and the vibro-acoustic signatures of the differently cracked road pavement under test (i.e., the acoustic responses of the pavement to a given load) were recorded and analyzed in different domains of analysis. Results show that features extracted from the vibro-acoustic signature of road pavements, monitored using the proposed system, can be used to detect the occurrence and the propagation of damages (in this case, with an average model's accuracy of 61%) and this information can be used to improve the maintenance process by means of innovative P-F curves.

**KEY WORDS:** Road Infrastructure, Monitoring, Maintenance, Vibro-Acoustic Signature, Smart Cities, Smart Roads.

## 1. Introduzione

Città intelligenti hanno bisogno di infrastrutture progettate o gestite tenendo presenti sostenibilità, efficienza, sicurezza e resilienza. Questo modo di pensare ha fatto emergere il concetto di Sistema di Trasporto Intelligente (dall'inglese *Intelligent Transportation System*, ITS; [1, 2]). Attualmente, metodi basati su test distruttivi e non (dall'inglese *Destructive test*, DT, e *Non-Destructive Test*, NDT) vengono usati per stimare le caratteristiche e le prestazioni delle strade [3, 4].

Da una parte, malgrado i metodi DT (ad es. il carotaggio) siano ben noti, largamente diffusi ed utili ad effettuare un monitoraggio profondo (cioè ad identificare danni nascosti), questo tipo di metodi può essere considerato non sostenibile, inefficiente e non sicuro.

Dall'altra parte, anche se i metodi NDT sono più sostenibili di quelli distruttivi, loro sono (a) ancora scarsamente utilizzati (si veda ad es. [5]), (b) spesso usati per il monitoraggio superficiale (ad es. quelli basati sull'analisi di im-

magini [6]), (c) puntuali, e (d) richiedono molto tempo. Di conseguenza, le soluzioni innovative dovrebbero essere più sostenibili (ad es. usando sensori [7-9]), in grado di eseguire un monitoraggio "globale" (cioè di rilevare danni sia superficiali che profondi) e "continuo" dal punto di vista temporale e spaziale.

Di solito, le infrastrutture sono gestite agendo sul traffico [10], oppure usando strumenti quali i cosiddetti PMS (dall'inglese *Pavement Management Systems*), e/o le analisi RAMS ed LCC (dall'inglese *Reliability, Availability, Maintainability* e *Safety* e *Life Cycle Costing*, rispettivamente) [11, 12]. Spesso, manutenzione e rifacimento sono programmate in base ai danni funzionali (ad es. una buca; si veda punto F nella figura (vedi Fig. 1).

Com'è stato largamente dimostrato dalla teoria che sta dietro i PMS [11, 13], interventi tempestivi basati sulle condizioni effettive delle pavimentazioni stradali (punto P della curva P-F; dove P indica i danni Potenziali) permettono sia la riduzione dei costi (circa i 4/5 dei costi di un danno funzionale), che l'estensione della vita utile.

Quindi, innovazioni possono essere ottenute: i) passando ad un approccio basato sulle reali condizioni (monitoraggio continuo), o predittivo (prevedere un danno superficiale dal danno nascosto; (vedi Fig. 1)); ii) applicando soluzioni che permettano alle “strade intelligenti” di monitorare il loro stato di salute strutturale (dall’inglese *Structural Health Status*, SHS), rilevare i danni nascosti e condividere questa cruciale informazione con le autorità preposte con gli utenti dell’infrastruttura.

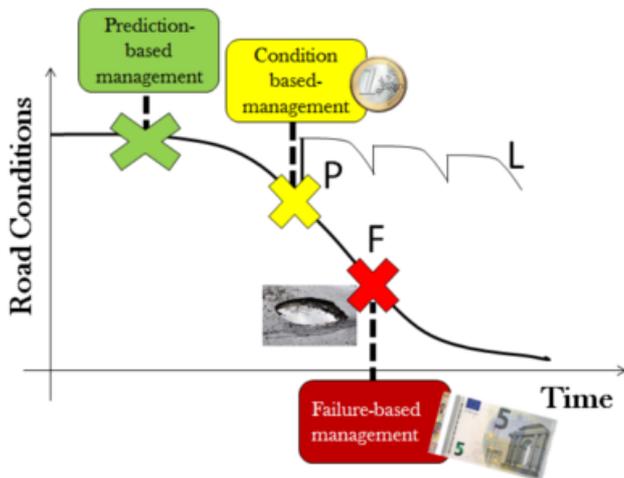


Fig. 1 - Esempio di curva P-F (P=danno potenziale; F=danno funzionale; curva L=estensione vita utile).  
(Fonte: propria elaborazione)

## 2. Obiettivi

Gli obiettivi principali di questo articolo sono: 1) Presentare un approccio innovativo, basato su studi precedenti dello stesso autore [14-18]; 2) Dimostrare che la firma vibro-acustica delle pavimentazioni stradali, sollecitate dai veicoli leggeri, può essere usata per il monitoraggio strutturale; 3) Dimostrare che caratteristiche significative (dall’inglese *features*) delle firme su citate possono essere utilizzate per riconoscere l’ammaloramento dello stato di salute strutturale delle strade.

## 3. Metodologia

La soluzione proposta consiste in un metodo (vedi Fig. 2) che mira a monitorare le pavimentazioni stradali in un modo sostenibile e innovativo.

L’innovazione è collegata al concetto di firma vibro-acustica, mentre la sostenibilità è dovuta al fatto che il metodo è non distruttivo (NDT) ed è basato su un sistema appositamente progettato (vedi Fig. 2).

In particolare: 1) Il metodo proposto considera la pavimentazione come un filtro acustico; 2) La firma vibro-acustica della pavimentazione può essere definita come la risposta acustica della pavimentazione alle vibrazioni indotte dai veicoli che si propagano nei vari strati (cioè la variazione della pressione dell’aria contenuta all’interno

di una copertura fono-isolante nella quale è inserito un microfono); 3) Il metodo mira a derivare le condizioni strutturali della pavimentazione (il filtro acustico in costante danneggiamento) dalla firma vibro-acustica.

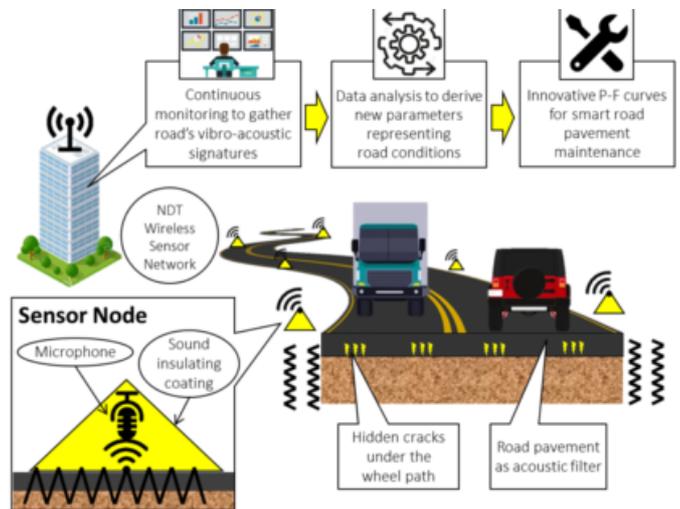


Fig. 2 - Schema della soluzione proposta.  
(Fonte: propria elaborazione)

## 4. Caso studio

### 4.1 Indagine sperimentale

La validazione del metodo proposto è stata fatta attraverso due differenti tipi di indagini sperimentali.

La differenza tra le due indagini è dovuta alla sorgente meccanica usata per sollecitare la pavimentazione stradale (cioè genera le vibrazioni e i suoni che nascono e si propagano nella pavimentazione, e che arrivano all’unità sensoriale). In particolare, un LWD (dall’inglese *Light Weight Deflectometer*) e un’automobile (dall’inglese *Car*) sono stati usati come sorgenti (vedi Fig. 3).

In questo articolo sono riportati i risultati relativi all’utilizzo della sorgente “Car”, i quali verranno poi comparati con quelli relativi alla sorgente “LWD” [15].

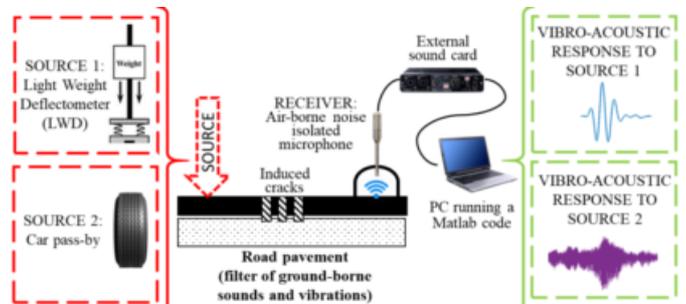


Fig. 3 - Rappresentazione schematica della catena di misura e dei segnali registrati.  
(Fonte: propria elaborazione)

Entrambe le indagini sperimentali sono state effettuate come segue: 1) Il sistema ricevente è stato attaccato (plastilina) sulla pavimentazione; 2) La pavimentazione è stata sollecitata usando la sorgente (cioè “LWD” o “Car”) ed è stata registrata (codice Matlab) la firma vibro-acu-

stica della pavimentazione non fessurata; 3) La pavimentazione è stata fessurata (cioè sono stati creati 43 fori disposti su tre linee; (vedi Fig. 4)) ed è stata registrata la firma vibro-acustica della pavimentazione fessurata. Si noti che in questo studio: i) un primo prototipo di unità sensoriale è stato usato (lo stesso usato nello studio [15]), il quale è costituito da un microfono (analogico, omnidirezionale, isolato dal rumore ambientale), una scheda audio esterna e un computer portatile (usato come alimentazione e registratore dei segnali); ii) Le firme vibro-acustiche sono segnali acustici; iii) 2200 e 4000 segnali sono stati registrati durante le indagini "LWD" e "Car", rispettivamente; iv) È stata usata una frequenza di campionamento di 192 kHz; v) La distanza sorgente-ricevitore, SR, era 200 cm; vi) La prima linea di fori è stata creata usando un trapano nella mezzeria della distanza SR, mentre la seconda e la terza linea sono state create parallelamente 5 cm prima e dopo la mezzeria.

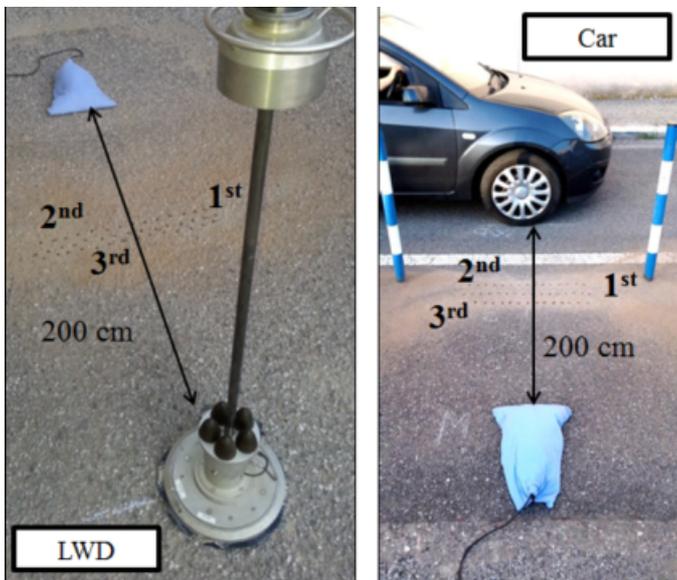


Fig. 4 - Indagine sperimentale eseguita usando l'LWD e un'automobile (Car) come sorgenti meccaniche su una pavimentazione stradale con tre linee di fori. (Fonte: propria elaborazione)

### 4.2 Analisi dei segnali

I segnali registrati durante l'indagine sperimentale descritta nella sottosezione precedente sono stati analizzati in tre diversi domini di analisi, cioè del tempo, della frequenza e del tempo-frequenza.

L'analisi era finalizzata a riconoscere ed estrarre dai segnali (dominio del tempo; (vedi Fig. 5a)), dagli spettri (dominio della frequenza; (vedi Fig. 5b)) e dagli scalogrammi (dominio tempo-frequenza; (vedi Fig. 5c)) delle *features* "significative", cioè in grado di mostrare la variazione dello stato strutturale della pavimentazione stradale indagata dovuta alla presenza dei danni indotti (cioè i fori).

Le seguenti *features* [15] sono state estratte dalla firma vibro-acustica della pavimentazione indagata, sollecitata dal passaggio di un'automobile (vedi Fig. 5): 1) Differenza

tra massimo P e minimo N assoluto dell'intensità dei segnali nel dominio del tempo (unità arbitraria, a.u.); 2) Il ritardo temporale tra N e P (millisecondi); 3) La deviazione standard dei segnali (a.u.); 4) Il massimo della Densità Spettrale di Potenza (PSD; decibel watt/hertz, dBW/Hz) nell'intervallo 200-500 Hz; 5) La pendenza della retta interpolante la PSD nell'intervallo 200-500 Hz (dBW); 6) Il centroide spettrale (che può essere pensato come il baricentro dello spettro [14]) della PSD nell'intervallo 20-500 Hz (Hz); 7) La massima entropia dei coefficienti CWC (dall'inglese *Continuous Wavelet Coefficients*, a.u.); 8) La pseudo-frequenza del picco degli scalogrammi (asse y dello scalogramma; Hz); 9) L'energia dei CWC compresa nell'intervallo 30-64 (cioè le aree rosse dello scalogramma; a.u.).

Infine, come nello studio precedente [15], un algoritmo capace di eseguire la classificazione gerarchica (dall'inglese *Hierarchical Clustering*) è stato usato per classificare sia le firme vibro-acustiche, che le *features* estratte. L'algoritmo su menzionato permette di classificare le osservazioni (ad es. i segnali o le *features*) basandosi sulla distanza Euclidea tra coppie di osservazioni.

In questo studio, ogni classe rappresenta uno stato strutturale (SHS) della pavimentazione stradale, cioè SHS0 si riferisce alla pavimentazione non danneggiata, SHS1, SHS2 e SHS3 alla pavimentazione con una, due, tra file di fori, rispettivamente.

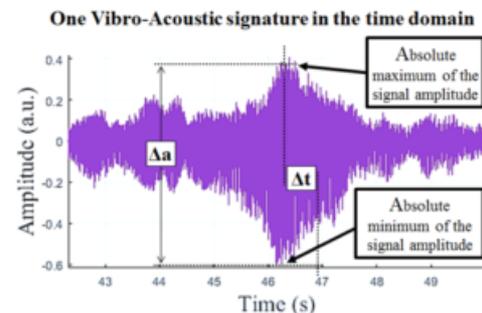


Fig. 5a - Esempio di firma vibro-acustica della pavimentazione stradale indagata generata dal passaggio di un'automobile, nel dominio del tempo. (Fonte: propria elaborazione)

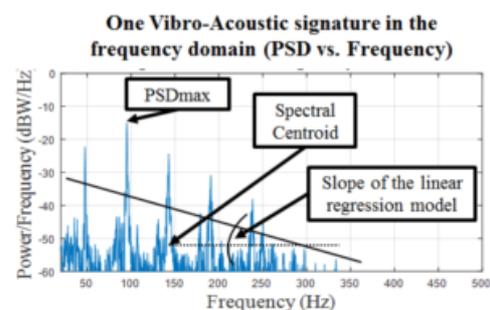


Fig. 5b - Esempio di firma vibro-acustica della pavimentazione stradale indagata generata dal passaggio di un'automobile, della frequenza. (Fonte: propria elaborazione)

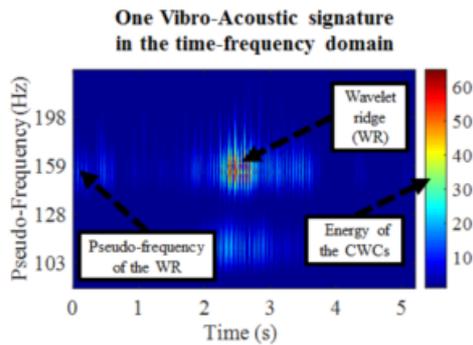


Fig. 5c - Esempio di firma vibro-acustica della pavimentazione stradale indagata generata dal passaggio di un'automobile, del tempo-frequenza.

[Fonte: propria elaborazione]

## 5. Risultati

In questa sezione sono riportati i risultati dell'indagine sperimentale (vedi Figg. 3 e 4) usando la sorgente "Car", i quali sono poi comparati con quelli ottenuti in uno studio precedente [15] (sorgente "LWD". Inoltre, in un altro lavoro [16], un'indagine analoga è stata condotta sulla stessa pavimentazione (sia integra che fessurata) e diversi ANN (dall'inglese *Artificial Neural Network*) sono stati utilizzati per riconoscere lo stato strutturale (SHS) della pavimentazione, a partire dai segnali registrati. Malgrado i risultati eccellenti ottenuti con gli ANN (il 99.1 % dei segnali è stato correttamente assegnato allo SHS di riferimento), l'uso di queste "scatole nere", non permette di identificare una o più *features* significative che possono essere usate per costruire curve P-F innovative (come richiesto dal metodo; (vedi Fig. 2)). Per questo, per identificare almeno una feature che descriva la variazione della firma vibro-acustica della pavimentazione sollecitata dal traffico veicolare, e capire se le stesse *features* usate nell'indagine con l'LWD possono essere usate in questo caso, i seguenti risultati sono stati riportati e discussi.

### 5.1 Estrazione delle features

La seguente figura (vedi Fig. 6) mostra gli andamenti delle nove features (si noti che i risultati dei 4000 segnali sono stati mediati per ottenere 400 valori) estratte nei tre domini di analisi dai segnali registrati durante l'indagine sperimentale descritta nella sezione 4. Nel dettaglio, ogni grafico della figura (vedi Fig. 6) mostra sull'asse Y i valori parzialmente mediati delle features, mentre l'asse X mostra la sequenza delle firme vibro-acustiche. Come è possibile vedere dalla figura (vedi Fig. 6), quando lo SHS va da SHS0 (strada non danneggiata) a SHS3 (strada danneggiata con tre file di fori), sei *features* su nove hanno un andamento crescente.

Comparando gli andamenti nel loro complesso con quelli delle otto *features* relative allo studio precedentemente citato [15] (cioè escludendo la quarta feature), è possibile

affermare che cinque *features* su otto sono congruenti, mentre gli altri sono abbastanza diversi. In particolare, le *features* #1, #3, #5, #6 e #9 hanno andamenti simili, mentre le #2, #7 e #8 hanno andamenti opposti. Queste differenze possono essere attribuite al diverso tipo di segnale generato dalle due diverse sorgenti usate, cioè un impulso nel caso di LWD, e un segnale pseudo-random nel caso della sorgente "Car".

Come nello studio [15], rilevante si è dimostrato l'andamento della feature #7, cioè dell'Entropia dei CWC. Anche se in questo caso non mostra un andamento marcato, essa varia maggiormente al peggiorare dello SHS (da SHS0 a SHS3), e questo risultato conferma che la "caoticità" dei segnali ricevuti aumenta (o che si ha una perdita maggiore dell'informazione contenuta dal messaggio originario; cfr. [19]) dovuta all'interazione tra i segnali generati e i danni indotti.

Inoltre, questa interazione porta alla dissipazione dell'energia dei segnali generati che è chiaramente mostrato dagli andamenti delle *features* #1 (cioè la differenza tra il massimo assoluto e il minimo assoluto dell'ampiezza dei segnali) e #9 (cioè l'energia dei CWC), confermando i risultati dello studio precedente [15].

L'effetto del peggioramento dello SHS della pavimentazione può essere letto anche in termini frequenziali, tenendo conto dell'andamento della feature #6 (cioè il centroide spettrale), e ricordando che il metodo considera la pavimentazione come un filtro acustico (vedi Figg. 2 e 3). La feature #6 mostra un andamento crescente che conferma i risultati precedenti [15].

Questo importante risultato mostra che i fori creati nella pavimentazione stradale rendono tale pavimentazione un filtro passa-basso, che impedisce la trasmissione dei segnali con lunghezza d'onda più piccola e permette il passaggio di quelli con lunghezza d'onda più grande. Questo risultato è ulteriormente confermato dall'andamento della feature #4 (cioè il massimo assoluto della PSD nell'intervallo 20-500 Hz).

### 5.2 Classificazione dello stato strutturale

La seconda parte dell'analisi dati ha riguardato l'utilizzo dell'algoritmo di classificazione gerarchica su menzionato sia sui segnali che sulle *features*.

I risultati hanno mostrato che non è stato possibile classificare correttamente i segnali. Malgrado sia stato ottenuto questo risultato negativo (ma atteso), l'algoritmo ha fornito i risultati incoraggianti riportati in tabella (vedi Tab. 1) relativi all'uso delle *features*.

Basandoci sui risultati in tabella (vedi Tab. 1) è possibile affermare che: 1) È possibile classificare correttamente il 50% dei segnali usando una combinazione di quattro *features* (cioè 2+4+6+8), oppure due combinazioni di cinque *features*. 2) Il miglior risultato può essere ottenuto usando una combinazione di sei *features* che permette

## Mobilità, Accessibilità, Infrastrutture

di classificare correttamente il 61% dei segnali. Questa percentuale può essere raggiunta anche usando combinazioni di sette e otto *features*. 3) Non è possibile classificare correttamente i segnali usando tutte le possibili combinazioni di due, tre e nove *features* (cioè #F = 2, 3 e 9). Lo stesso risultato è stato ottenuto usando una *feature* per volta (#F = 1). Infine, gli andamenti delle *features* visti in precedenza (vedi Fig. 5) possono essere utilizzati per definire il confine tra diversi stati strutturali,

oppure soglie, per esempio (vedi Fig. 7a) tra una condizione priva di rischi [dall'inglese Risk-free zone] relativa all'assenza di danni, una condizione di allarme [dall'inglese Warning zone] e una condizione di allerta [dall'inglese Alert zone] relativa ad un danno funzionale. Infine, curve P-F innovative possono essere create usando le *features* più significative tra quelle riportate di seguito (ad es. la #9; [vedi Fig. 7b]).

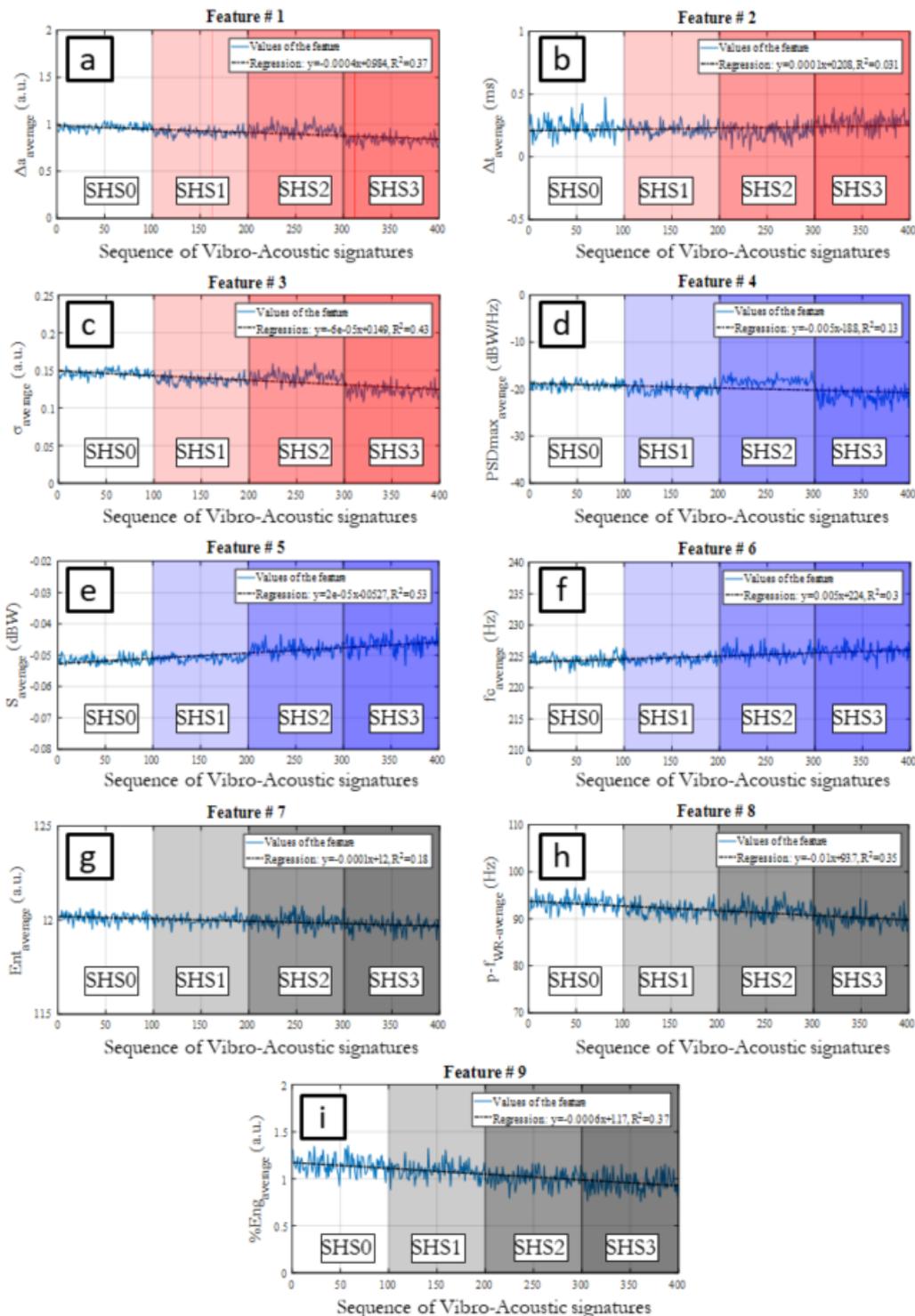


Fig.6 - Andamenti delle features estratte nei domini del tempo [a, b, c], della frequenza [d, e, f], e tempo-frequenza [g, h, i] dai segnali registrati durante l'indagine sperimentale usando la sorgente "Car".  
(Fonte: propria elaborazione)

# F	F	PC/Max OPC (%)	SHS0	SHS1	SHS2	SHS3	Max OPCAV (%)
1-3	n.a.	PC Max OPC (%)	- -	- -	- -	- -	-
4	2+4+6+8	PC Max OPC (%)	4 60	1 41	2 42	3 56	50
5	2+4+5+6+8 2+3+4+6+8	PC Max OPC (%)	4 60	1 41	2 42	3 56	50
6	1+2+4+7+8+9	PC Max OPC (%)	3 78	2 60	1 45	4 60	61
7	1+2+4+5+7+8+9 1+2+3+4+7+8+9	PC Max OPC (%)	3 78	2 60	1 45	4 60	61
8	1+2+3+4+5+7+8 +9	PC Max OPC (%)	3 78	2 60	1 45	4 60	61
9	n.a.	PC Max OPC (%)	- -	- -	- -	- -	-

Simboli. #F = numero di *features* usate come input durante la classificazione; F = combinazione di *features* che porta ad una corretta classificazione; SHSi = i-esimo stato strutturale (dall'inglese *Structural Health Status*) della pavimentazione stradale, dove i = 0, 1, 2 e 3, corrispondenti a 0, 15, 29 e 43 fori; PC = Classe predetta; Max OPC (%) = la più alta percentuale di osservazioni associata alla PC; Max OPCAV (%) = media del valore Max OPC (%); n.a. = non disponibile (dall'inglese *not available*) dovuto a una classificazione errata.

Tab. 1 - Risultati della classificazione gerarchica delle *features* estratte.  
(Fonte: propria elaborazione)

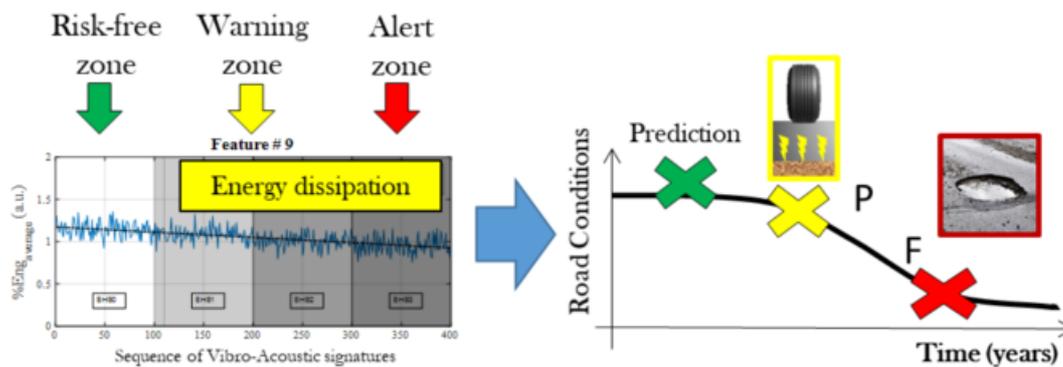


Fig.7 - Esempio di *feature* [a] che può essere usata per creare curve P-F innovative [b].  
(Fonte: propria elaborazione)

## 6. Conclusioni

L'obiettivo di questo studio era lo sviluppo di un metodo non distruttivo basato su *features* che potesse essere utilizzato per rendere più intelligente la gestione delle pavimentazioni stradali.

I risultati mostrano che *features* estratte dalla firma vibro-acustica delle pavimentazioni suddette (cioè la loro risposta acustica a carichi prodotti da veicoli leggeri) può essere usata per riconoscere (61% di corrette classificazioni usando un classificatore gerarchico) la presenza e l'accrescimento di fessure indotte.

Quindi, *features* significative possono essere utilizzate per costruire curve P-F innovative capaci di migliorare il processo manutentivo delle pavimentazioni stradali.

## Bibliografia

[1] Qureshi K.N., Abdullah A.H.: *A survey on intelligent transportation systems*. In: Middle East Journal of Scientific Research, n. 15(5), pp. 629-642, 2013

[2] Chandra Y.R.V. S. et al.: *Intelligent transport system*. In: International Journal of Civil Engineering and Technology, n. 8(4), pp. 2230 - 2237, 2017

[3] Boscaino G., Praticò F.G.: *A classification of surface texture indices of pavement surfaces*. In: Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussees, n. 234, 2001

[4] Praticò F.G., Moro A.: *In-lab and on-site measurements of hot mix asphalt density: Convergence and divergence hypotheses*. In: Construction and Building Materials, n. 25(2), pp. 1065 - 1071, 2011

[5] Commuri S. et al.: *REPORT NO. OT-CREOS11.1-14-F - Pavement evaluation using a portable lightweight deflectometer*, 2012

[6] Kaur E.H.: *A Review on Crack Detection and Parameters Estimation on Road Images*. In: International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, n. 5(2), pp. 1 - 4, 2017

[7] Guerrero-Ibáñez J. et al.: *Sensor technologies for intelligent transportation systems*, 2018

[8] Askari H. et al.: *Embedded self-powered sensing systems for smart vehicles and intelligent transportation*, 2019

[9] Hasni H. et al.: *A self-powered surface sensing approach for detection of bottom-up cracking in asphalt concrete pavements: Theoretical/numerical modeling*. In: Construction and Building Materials, n. 144, pp. 728 - 746, 2017

[10] Praticò F.G. et al.: *Transport and traffic management by micro simulation models: Operational use and performance of roundabouts*.

In: WIT Transactions on the Built Environment, n. 128, pp. 383 - 394, 2012

[11] Uddin W.: *Pavement management systems*. In: The Handbook of Highway Engineering, pp. 18 - 70, 2005

[12] Praticò F.G., Giunta M.: *Proposal of a Key Performance Indicator for Railway Track Based on LCC and RAMS Analyses*. In: Journal of Construction Engineering and Management, n. 144[2], 2018

[13] Fedele R. et al.: *Energy savings in transportation: Setting up an innovative SHM method*. In: Mathematical Modelling of Engineering Problems, n. 5[4], pp. 323 - 330, 2018

[14] Fedele R. et al.: *Instrumented infrastructures for damage detection and management*. In: 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, MT-ITS 2017 - Proceedings, pp. 526 - 531, 2017

[15] Fedele R., Praticò F.G.: *Monitoring infrastructure asset through its acoustic signature*. In: INTER-NOISE 2019 MADRID - 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, 2019

[16] Praticò F.G. et al.: *Detection and monitoring of bottom-up cracks in road pavement using a machine-learning approach*. In: Algorithms, n. 13[81], p. 1 - 16, 2020

[17] Fedele R. et al.: *Comparing mother wavelet selection criteria for road pavements NDT monitoring*. In: Bituminous Mixtures and Pavements VII, pp. 618 - 623, 2019

[18] Fedele R. et al.: *Sensing road pavement health status through acoustic signals analysis*. In: PRIME 2017 - 13th Conference on PhD Research in Microelectronics and Electronics, Proceedings, pp. 165 - 168, 2017

[19] Chai M. et al.: *A new qualitative acoustic emission parameter based on Shannon's entropy for damage monitoring*. In: Mechanical Systems and Signal Processing, n. 100, pp. 617 - 629, 2018

