

## Il LiDAR per la misura delle irregolarità superficiali delle infrastrutture viarie

Maria Rosaria De Blasiis<sup>(a)</sup>, Alessandro Di Benedetto<sup>(a)</sup>, Margherita Fiani<sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup> Dipartimento di Ingegneria, Università RomaTRE, Via Vito Volterra, 62, 00146, Roma

<sup>(b)</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084, Fisciano (SA)

### Riassunto

Il monitoraggio delle condizioni di ammaloramento superficiale delle pavimentazioni stradali assume un ruolo fondamentale nell'analisi della qualità funzionale di una sovrastruttura, influenzando in modo sostanziale la sicurezza degli utenti e dell'infrastruttura stessa. Lo scopo del nostro lavoro è l'analisi e la ricostruzione tridimensionale della superficie viaria facendo uso di tecnologie LiDAR (Light Detection And Ranging), utilizzando sia Laser Scanner Terrestri (LST) che mobili (Mobile Mapping System - MMS) in modo da ottenere un set di dati completo che permetta di ricostruire un preciso e accurato modello geometrico della superficie stradale. La sperimentazione ha riguardato un segmento di strada lunga 100 metri la cui superficie è stata rilevata per mezzo di due LST (uno strumento a misura di fase e uno a tempo di volo) e un MMS per analizzare le loro prestazioni e confrontare i risultati in un caso test. I punti appartenenti alle scansioni laser sono stati interpolati per ottenere un modello numerico della superficie stradale su cui sono state misurate le irregolarità, implementando algoritmi ad hoc in ambiente Matlab.

### Abstract

The monitoring of pavement distress takes a key role with respect to functionality of a road structure, which is necessary to schedule maintenance works, optimizing the available resources, influencing in a substantial way the safety of users and the infrastructure. The aim of this work is the analysis and the three-dimensional reconstruction of the paved surface making use of innovative technologies of measure and calculation, in order to obtain a complete and accurate data sets. With the evolving LiDAR (Light Detection And Ranging) technologies, including terrestrial and mobile laser scanner, it is possible to obtain very dense point clouds, that allow to build an accurate geometrical model of the road surface. The experimentation concerned a 100 meter long road segment whose surface has been surveyed by means of two Terrestrial Laser Scanners (a phase-shift instrument and a time-of-flight one) and a Mobile Mapping System to analyze their performances and compare the results in a test case. Collected data have been interpolated to obtain a numerical model of the road surface on which the irregularities have been measured, implementing relevant algorithms in the Matlab environment.

### 1. Introduzione

Lo studio proposto ha come obiettivo l'individuazione di metodologie e procedure di rilievo utili a produrre dati metrici più dettagliati rispetto alle tecniche tradizionali di supporto all'ingegneria civile. In particolare si vuole studiare la potenzialità dei dati LiDAR (Light Detection And Ranging) per produrre modelli tridimensionali utili all'analisi e al monitoraggio, dallo studio morfometrico all'analisi delle deformazioni delle sovrastrutture stradali.

Lo studio della regolarità è generalmente affidato a indici di stato che sono rappresentativi delle prestazioni della pavimentazione ai fini della sicurezza e del confort dell'utente. La normativa definisce la regolarità superficiale come la deviazione della superficie pavimentata reale rispetto ad

una superficie di riferimento, con caratteristiche dimensionali che influiscono sulla dinamica del veicolo e sulla qualità di guida (ASTM E 867).

I principali Indici di stato sono determinati a partire da profili geometrici ottenuti effettuando una sezione della superficie stradale, mediante un piano verticale.

Risulta molto importante lo studio della discretizzazione della superficie mediante metodi di misura LiDAR perché uno degli obiettivi primari è la determinazione di una superficie più fedele possibile alle condizioni reali. La tecnologia LiDAR ha le potenzialità per determinare un profilo ‘vero’ in modo più efficace rispetto ai metodi tradizionali statici (Chin, Olsen, 2012) e offre un significativo vantaggio fornendo informazioni di tutta la superficie stradale.

Un aspetto importante è che la ricostruzione della superficie su grigliato deve essere funzione non solo della densità del dato di partenza ma del dettaglio di tessitura che si vuole indagare. I difetti superficiali della pavimentazione sono associati a determinate classi di tessitura, caratterizzate da una certa lunghezza d’onda, quindi se si vuole caratterizzare la superficie viaria in modo tale da valutare le irregolarità e altri tipi di ammaloramento come buche, ondulazioni, bisogna ricostruire un grigliato proporzionale ai valori della classe di tessitura delle Irregolarità e della Megatessitura.

La tecnologia *Mobile Mapping Survey* (MMS) ha maggiori vantaggi in termini di celerità della misura e di sicurezza rispetto alla tecnologia statica *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) (Glennie, 2009), dato che le interferenze con l’esercizio della sovrastruttura sono del tutto eliminate.

I dati raccolti possono essere utilizzati per diverse analisi geometriche; Amadori (2011) ha dimostrato che i dispositivi MMS possono essere utilizzati per verificare le pendenze trasversali (Herr, 2010) e presenta diversi esempi su come il dato mobile può essere utilizzato per valutare le condizioni superficiali della pavimentazione. Tang et al. (2011) presentano un algoritmo in grado di determinare i difetti di planarità di superfici in calcestruzzo. La versatilità e le molteplici informazioni ottenibili da un dato misurato con dispositivi Lidar Mobile sono riportate nelle linee guida (Olsen et al, 2013).

La profilatura mediante l’utilizzo di sistemi mobile ancora oggi è discussa, visto che questi tipi di dispositivi hanno una precisione e accuratezza inferiore ai dispositivi statici (TLS) (Chin, Olsen, 2012). Un confronto può essere effettuato con una misura della regolarità sui dati ottenuti da dispositivi Lidar statici (TLS) e dispositivi dinamici (MMS).

Scopo del nostro lavoro è valutare le differenze dal punto di vista tridimensionale tra il dato ottenuto da rilievo mobile, acquisito ad una velocità tale da non recare disagio all’esercizio della sovrastruttura, e il dato ottenuto a partire da una misura mediante un dispositivo statico (TLS).

Un confronto diretto dei profili non può essere effettuato perché i profili geometrici determinati a partire dalle scansioni tridimensionali di dispositivi *Mobile* non soddisfano ancora i requisiti per l’utilizzo in applicazioni di profilatura.

## 2. Metodi e materiali

L’Area Test è stata scelta in modo che presentasse un’alterazione molto pronunciata delle regolarità sia trasversali che longitudinali; questo ha permesso di individuare e calibrare una procedura di elaborazione completa. La sperimentazione è stata eseguita su di un tratto di strada (Figura 1) appartenente alla Via della Vasca Navale (Roma). La tratta in esame è caratterizzata da un rettifilo con uno sviluppo di circa 100 metri, la sezione trasversale è costituita da un’unica carreggiata di larghezza pari a 11 metri; ogni corsia è larga 3.50 metri, lo spazio restante lungo i cigli è destinato al parcheggio.

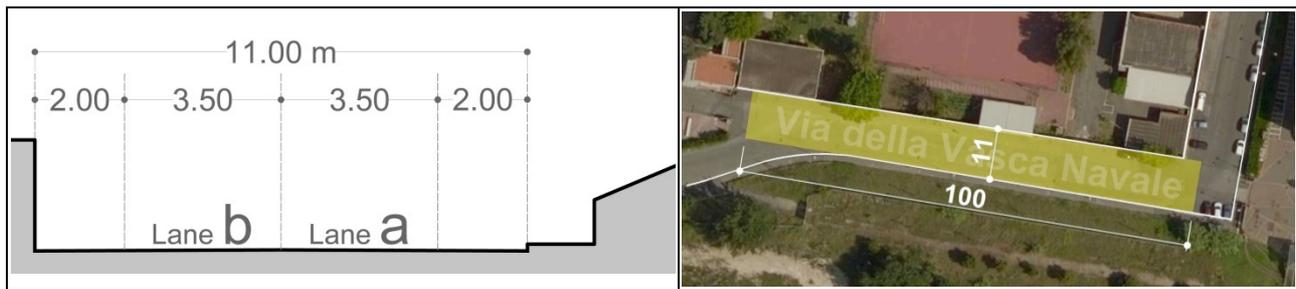


Figura 1 - Sezione tipo e planimetria generale

La sperimentazione è stata condotta mediante la misura con due dispositivi che sfruttano la tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*): un *Laser Scanner Terrestre* (TLS) a stazione fissa su treppiede, il quale richiede molteplici stazioni e l'utilizzo di *targets* per la georeferenziazione e un *Laser Scanner Mobile* (MLS) montato su un veicolo, che permette una misura molto più celere, ideale per la mappatura tridimensionale di una strada.

Il rilievo statico (Figura 2, Tabella 3) è stato effettuato con il TLS Ilris 36D della Optech con l'ausilio di sei target. La disposizione delle stazioni e dei target sono state scelte in modo da evitare più possibile ombre e oclusioni e avere risoluzione omogenea delle scansioni, visibilità di almeno tre target per scansione, riduzione al minimo dell'interferenza con l'esercizio della sovrastruttura. Sono stati utilizzati sei target sferici in materiale polimerico ad alta riflettanza, montati su aste rette da bipedi, rese verticali e posizionati ai cigli della strada con una distribuzione omogenea.

La posizione dei target è stata misurata in campagna con tecniche GNSS per poter inserire la nuvola di punti all'interno di un sistema di riferimento esterno, nel nostro caso cartografico UTM/WGS 84. È stato utilizzato il passo minimo dello spot angolare  $0.00115^\circ$ , equivalente a una risoluzione di 2mm a 100 metri di distanza, in modo tale da avere una nuvola di punti più densa possibile. L'angolo di scansione fisso è di  $40^\circ \times 40^\circ$ , il laser era fornito di una base rotante la quale ha permesso di avere una visuale più ampia, da  $-182^\circ$  a  $+182^\circ$ . Sono state effettuate tre stazioni.

Il rilievo dinamico (Figura 4, Tabella 5) è stato effettuato con lo scanner Riegl VMX- 450 montato sul tetto di un'autovettura. È dotato di dispositivi di misurazione inerziale e attrezzature GNSS, alloggiati sotto una calotta di protezione aerodinamica, per poter effettuare scansioni in movimento e georeferenziarle rispetto al sistema di riferimento prescelto. È costituito da due scanner laser Riegl vQ-450 inclinati di  $35^\circ$ , ognuno con un campo visivo di  $360^\circ$  (tipo di configurazione chiamata 'Butterfly'). Nella scansione dinamica, i parametri essenziali da osservare sono la velocità del veicolo e la frequenza di acquisizione degli scanner. Sono state effettuate diverse misure a diverse velocità del veicolo, a parità di frequenza di acquisizione; è stata utilizzata la scansione prodotta con una velocità tale da eliminare le interferenze con il regolare esercizio della sovrastruttura (60 km/h). In totale si hanno 4 scansioni; la scansione è avvenuta in entrambi i versi di percorrenza della strada (due passaggi), ogni scanner produce una scansione, quindi, si hanno due scansioni per ogni passaggio.



Figura 2 - Stazione TLS, target e disposizione stazioni e target

Strumentazione	Stazioni	H. angle resolution( $\mu$ Rad)	V. angle resolution( $\mu$ Rad)
ILRIS 3D Optech	3	20 (0.00115° = 2mm a 100m)	20 (0.00115° = 2mm a 100m)

Tabella 3 - Setup Optech Ilris 3D



Figura 4 - Laser Scanner Mobile Riegl VMX-450

Nome File	Distanza ipotetico bersaglio (Mt)	Velocità di passaggio impostata su sistema (Km/H)	Velocità di passaggio reale (Km/H)	Impulsi Laser (Hz)	Ripetizione Nr.
5-60-550 60Km 1 Scanner 1	5	60	60	550	1
5-60-550 60Km 1 Scanner 2	5	60	60	550	1
5-60-550 60Km 2 Scanner 1	5	60	60	550	2
5-60-550 60Km 2 Scanner 2	5	60	60	550	2

Tabella 5 - Setup Mobile Laser Scanner Riegl VMX -450

### 2.1 Generazione Superfici (DEM)

Il prodotto ottenuto dalle misure è un insieme di punti, ognuno con una terna di coordinate che ne caratterizza la posizione rispetto al sistema di riferimento adottato. La nuvola di punti deve poi essere interpolata su un grigliato per produrre un modello digitale delle elevazioni (*Digital Elevation Model*, DEM).

Il DEM è stato generato mediante l'utilizzo dell'Interpolatore IDW (*Inverse Distance Weighted*) il quale esegue una media pesata sulla distanza dei punti misurati ricadenti all'interno di una determinata area di ricerca; il peso di un dato di input è inversamente proporzionale alla distanza dal valore da stimare. L'intervallo tra i nodi del grigliato è proporzionale ai valori della classe di tessitura da indagare, nel campo delle Irregolarità e della Megatessitura e ad un valore che minimizza i residui.

Il valore residuo, utile per verificare la bontà della costruzione del DEM, è determinato come differenza del valore reale di input e il valore determinato da interpolazione. In Tabella 6 sono riportati alcuni valori statistici sui residui. In Figura 7 sono mostrate le mappe di tipo *shaded relief* elaborate sui due DEMs (LS statico e mobile)

Statistica dei residui		
	MMS	TLS
Number of values	14680293	10294423
Minimum	-0.051561164	-0.044469302
Maximum	0.103620482	0.071791612
Mean	-1.30149E-06	9.64402E-06
Variance	3.27175E-06	9.98289E-06
Standard deviation	0.001808797	0.003159572
n° residuals < 5mm	98.77%	95.95%

Tabella 6 - Statistica dei residui (da Surfer)

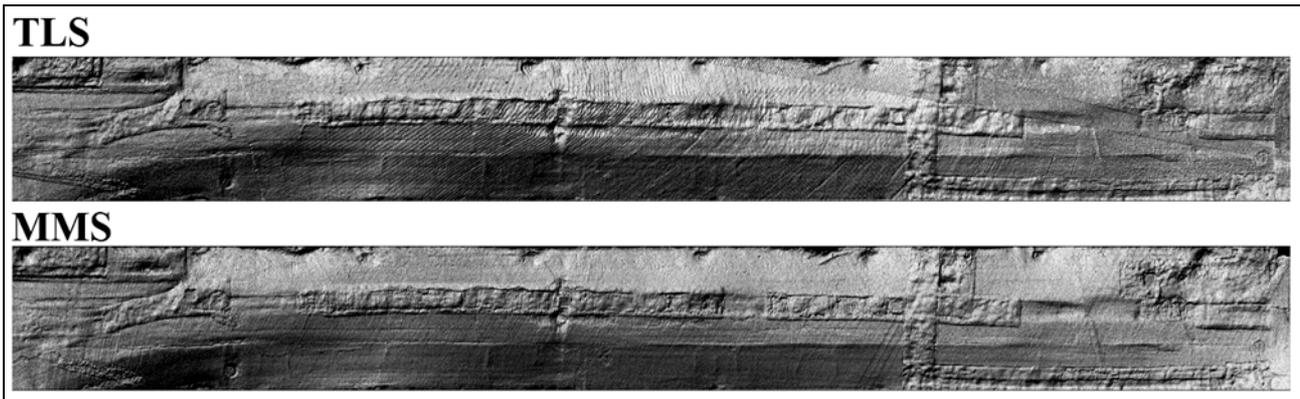


Figura 7 - Mappe 'Shaded Relief'

### 3. Valutazione delle irregolarità

Per poter effettuare una analisi della superficie della pavimentazione ottenuta è stato utilizzato il *Matlab* come ambiente di calcolo.

Il Grid ottenuto dal processo di interpolazione è una matrice, ogni componente della matrice è rappresentata dalla componente Z. Ad ogni componente Z è associata una coppia di coordinate (X,Y) che ne rappresenta la posizione nello spazio. Risulta semplice, quindi, associare a una matrice grid, un array bi-dimensionale contenente le coordinate di ogni nodo del grid.

L'analisi si basa sullo studio dell'errore di planarità, ovvero, la deviazione della superficie pavimentata rispetto ad un piano di riferimento. Una prima analisi effettuata prevede la creazione di una superficie piana a due falde costruita in modo tale da poggiare sulla superficie reale (teoricamente una sezione trasversale stradale è rappresentata da una doppia falda per permettere il deflusso delle acque).

La costruzione dei piani verrà effettuata su pezzi di strada larghi quanto tutta la carreggiata e lunghi tra i tre ed i cinque metri. Affinché la falda poggi sulla superficie generata è stato utilizzato un algoritmo di tipo iterativo; ad ogni iterazione l'algoritmo esclude i punti al di sotto del piano ottenuto per interpolazione precedente. In tal modo, nel ciclo successivo il nuovo piano verrà costruito per interpolazione sulla base dei soli dati che all'iterazione precedente si trovavano al di sopra del piano; questo metodo fa sì che il piano si orienti in funzione del numero di punti rimanenti ad ogni ciclo iterativo (Figura 9).

L'analisi consiste nel determinare la differenza di altezza tra la superficie piana a doppia falda e la superficie della pavimentazione; con l'ausilio di un algoritmo che associa ad ogni differenza di quota  $\Delta Z$  una terna RGB, è possibile avere una visualizzazione grafica delle deformazioni della pavimentazione, rispetto alla superficie di riferimento a doppia falda. Per quantificare il valore delle depressioni che superano una certa soglia, oppure, che fanno parte di un *range* di valori assegnati, è stato implementato un algoritmo in grado di circoscrivere le suddette zone in modo da calcolarne il perimetro, l'area, il volume e la posizione nello spazio. Tale algoritmo si basa su un codice di segmentazione.

Con il tool *ImInspect* del software *Polyworks* è possibile infine confrontare le due superfici generate. Il risultato è di tipo grafico (Figura 10), la barra graduata permette una lettura delle variazioni di quota in metri.

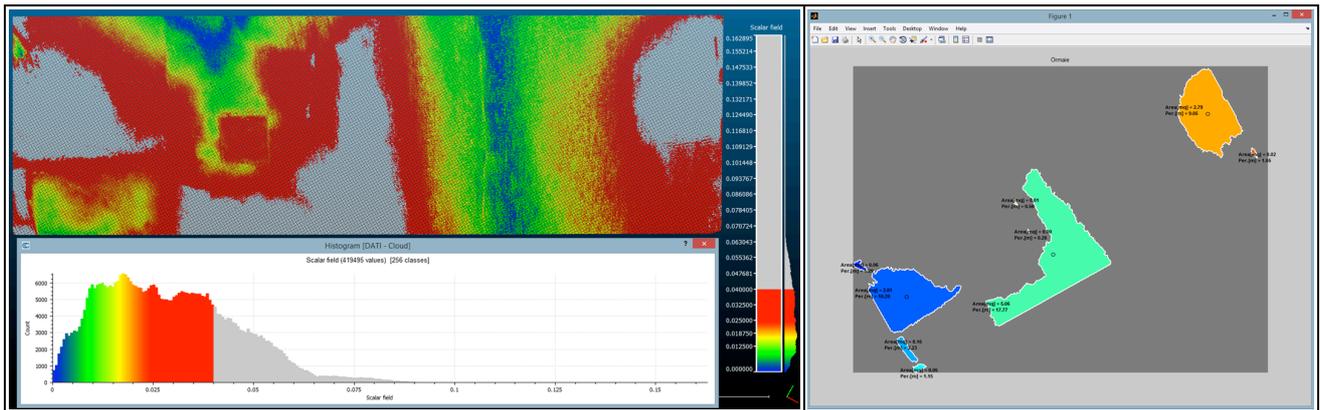


Figura 8 - Rappresentazione delle variazioni di  $\Delta Z$  e segmentazione di uno stralcio di superficie

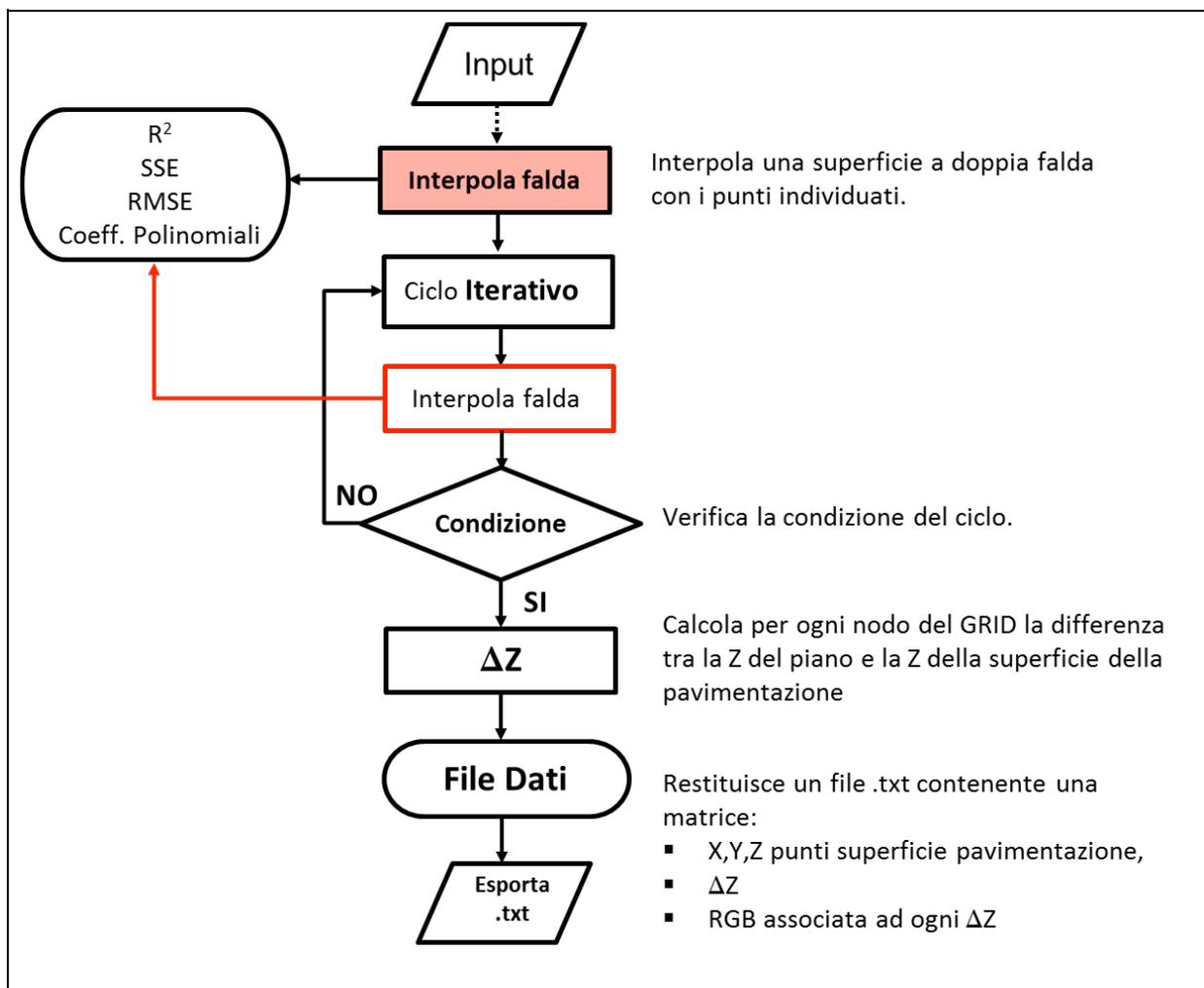


Figura 9 - Ciclo Sintetico dell'Algorithmo

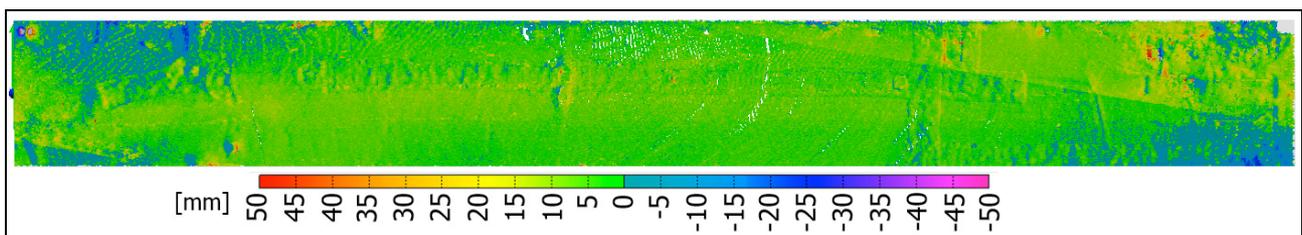


Figura 10 - Confronto tra TLS e MMS in Polyworks

#### 4. Discussione e conclusioni

L'impiego della tecnologia LiDAR, integrata con tecniche di misurazione GPS, ha consentito di ottenere informazioni più dettagliate rispetto alle tecniche tradizionali sullo "stato di degrado" della pavimentazione stradale, da poter analizzare.

Attraverso la ricostruzione tridimensionale della superficie viaria è stato possibile identificare, classificare, misurare e monitorare le diverse tipologie di degrado. Inoltre, la stessa risulta essere una metodologia alternativa ai metodi tradizionali per la determinazione dei principali indici di stato che descrivono lo stato di degrado della pavimentazione.

Molteplici sono i vantaggi introdotti dal laser scanner, tra i quali la rapidità nell'esecuzione del rilievo in condizioni di sicurezza e senza compromettere il corretto esercizio della viabilità, oltre ad avere la possibilità di produrre una grande quantità di dati ad alta precisione. L'analisi delle misure acquisite sulla pavimentazione test ha permesso di individuare e calibrare un'originale procedura di elaborazione, implementata in Matlab, volta all'analisi della irregolarità.

Lo studio effettuato conferma l'utilità della topografia per l'analisi di fenomeni che riguardano la irregolarità delle pavimentazioni infrastrutturali. È bene infine evidenziare che data la sua natura tridimensionale, l'output del rilievo laser scanner ha un forte impatto visivo e ben si presta per rilevare lo stato di fatto, fasi intermedie e finali di un'opera civile. Non solo è utilizzabile come insostituibile fonte di dati metrici ma le misure acquisite sulle zone limitrofe alla strada possono essere immesse in una banca dati e consentire molteplici studi, quali ad esempio la verifica della segnaletica orizzontale e verticale, l'organizzazione di un catasto strade tridimensionale, il supplemento per il catasto urbano e altro ancora.

Lo studio effettuato vuole mettere in evidenza una metodologia alternativa per l'analisi della regolarità superficiale con l'ausilio delle nuove tecnologie di rilevamento; non risulta essere solo un'alternativa ma anche un complemento ed un approfondimento alle metodologie tradizionali che molto spesso ostacolano il corretto esercizio della sovrastruttura e non risultano essere abbastanza celeri.

#### Bibliografia

- Amadori, "Mobile LiDAR and Cross-Slope Analysis",  
<https://jasonamadori.com/2011/04/27/mobile-lidar-and-cross-slope-analysis>
- ASTM E867-06 (2012), "Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- Chin A., Olsen M. J. (2012), "Paving the Way for Terrestrial Laser Scanning Assessment of Road Quality." Thesis of Master of Science in Civil Engineering
- Glennie C. (2009), "Kinematic terrestrial light-detection and ranging system for scanning." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2105: 135–141
- Herr W. (2010), "Unification of roadway surface dimensional measurements", *Phoenix Scientific Inc.* [http://www.phnxsci.com/PPS/New\\_Paradigm\\_files/New%20Paradiam%202010\\_0121.pdf](http://www.phnxsci.com/PPS/New_Paradigm_files/New%20Paradiam%202010_0121.pdf)
- Olsen M. J., Roe G.V., Glennie C., Persi F., Reedy M., Hurwitz D., Williams K., Tuss H., Squellati A., Knodler M. (2013), "Guidelines for the Use of Mobile LIDAR in Transportation Applications" *Transportation Research Board, Washington, D.C. 2013*
- Tang P., Huber D., Akinci B. (2011), "Characterization of laser scanners and algorithms for detecting flatness defects on concrete surfaces", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 25(1): 31-42