

Controllo laser scanning del rifacimento della pavimentazione di una piazza

Domenico Visintini (*), Anna Spangher (**)

(*) Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Udine,
Via delle Scienze 206, 33100 UDINE, Tel. 0432 558719, e-mail: domenico.visintini@uniud.it

(**) Unità Operativa Ufficio Tecnico del Traffico, Comune di Udine,
Via Lionello 1, 33100 UDINE, Tel. 0432 271424, e-mail: anna.spangher@comune.udine.it

Riassunto

Questo articolo descrive l'uso del laser scanning terrestre (TLS) per il controllo del rifacimento della pavimentazione di piazza Matteotti di Udine, un'area di quasi 2.000 mq, ricoperta da circa 12.000 lastre in pietra, metà delle quali restaurate nei primi mesi del 2012. La pavimentazione è stata rilevata prima (aprile 2010) e dopo (aprile 2012) tale rifacimento con il TLS Riegl Z390i integrato con camera Nikon D200. Fra le varie elaborazioni eseguite, sono risultate fondamentali quelle di registrazione, su target e con metodo ICP, e quelle di costruzione dei rispettivi DSM. Per confrontare infine i due rilievi, si è eseguita la registrazione del DSM 2012 sul DSM 2010.

Il rilevamento TLS *ex ante* aveva confermato l'improrogabilità di un intervento di restauro, localizzando e quantificando cedimenti (anche di qualche centimetro) e pericolose lacune. Grazie al rilievo TLS *ex post* si è potuta verificare la congruenza del restauro con quanto progettato ed il significativo miglioramento della regolarità altimetrica della superficie della nuova pavimentazione.

Abstract

The paper describes the use of terrestrial laser scanning (TLS) to control the resurfacing of Piazza Matteotti of Udine, an area of almost 2,000 square meters, covered by about 12,000 stone slabs, half of which were restored in early 2012. The floor has been surveyed before (April 2010) and after (April 2012) this remake, with a Riegl Z390i TLS integrated with a Nikon D200 camera. Among the various processing performed, fundamentals are the scans registration, on target and with ICP method, and the construction of the respective DSM. Finally, to compare the two surveys, DSM 2012 has been registered onto DSM 2010. Ex ante TLS survey confirmed the need of the restoration, locating and quantifying failure (even few centimeters) and hazardous gaps. Thanks to the ex post TLS survey, it was possible to check the consistency of the restoration with the design and the significant improvement in the regularity elevation of the new floor surface.

1. Introduzione

Piazza Matteotti ha la forma di un trapezio scaleno di circa 3.400 mq (vedi Figura 1 a sinistra), con le due basi, poste approssimativamente nella direzione est-ovest, di dimensioni rispettivamente 75 m (a sud) e 60 m (a nord), un'altezza di 50 m (ad est) ed un lato obliquo di 65 m (ad ovest). Dal punto di vista storico e artistico, essa riveste un'importanza fondamentale per Udine, visto che ne è uno dei siti più antichi e uno dei fulcri intorno ai quali si è sviluppata la città (Della Porta, 1928): il fatto che essa sia nota agli udinesi con ben altri tre nomi (piazza Mercato Nuovo, piazza delle Erbe e piazza San Giacomo) sta a dimostrare la sua grande dinamicità durante i secoli.

Nel 1223, durante il patriarcato di Bertoldo di Andechs, la città ottenne il permesso di costituire un mercato con cadenze regolari, che cominciò a tenersi in un'area sotto il colle del Castello, oggi nota come "Mercato Vecchio". Più tardi esso fu trasferito dove oggi si trova Piazza Matteotti e fu detto

“Mercato Nuovo”. Nel corso dei secoli i mercanti iniziarono ad edificare baracche e ripari che poi vennero mutati in edifici in muratura, dando così alla piazza l’attuale conformazione. Oggi lungo i suoi tre lati corrono file di edifici porticati in stile veneziano. Sulla piazza si affacciano la Chiesa di San Giacomo (1398) e la Cappella delle Anime (1744), mentre al centro è collocata un’antica fontana (1543) e, verso la chiesa, la colonna con la statua della Madonna con Bambino (1487).

Proprio nel 1487 la parte centrale della piazza venne sopraelevata rispetto al piano stradale di due gradini, dando così luogo al “plateatico”, termine di origine feudale che corrisponde alla tassa dovuta all’utilizzo di un’area pubblica, con il quale si intende pure l’area stessa. Anche il plateatico ha forma assimilabile ad un trapezio isoscele di circa 2.000 mq di area, con basi 55 m e 47 m, altezza 38 m e lato obliquo 42 m. Esso fu lastricato con circa 12.000 piastre, quasi tutte in pietra piacentina con fugatura in sabbia fine di fiume, disposte a correre, con inclinazione (non del tutto regolare) obliqua di circa 45 gradi rispetto alle basi del trapezio. Tali lastre hanno dimensioni leggermente diverse, in media 41x41 cm, uno spessore ancor più variabile e sono lavorate a piano di sega. Il letto di posa venne realizzato con materiale terroso di risulta ed uno strato finale in sabbia.

Nel 1690 la piazza era già interamente circondata dagli edifici e non si hanno notizie di modifiche successive. Dall’analisi della mappa del catasto austriaco del 1843 (Figura 1 a sinistra) e da alcune fotografie d’epoca (Figura 1 a destra), si può desumere che la piazza abbia mantenuto fino ad oggi la stessa conformazione architettonica, acquisendo e conservando così il ruolo di “salotto di Udine”.

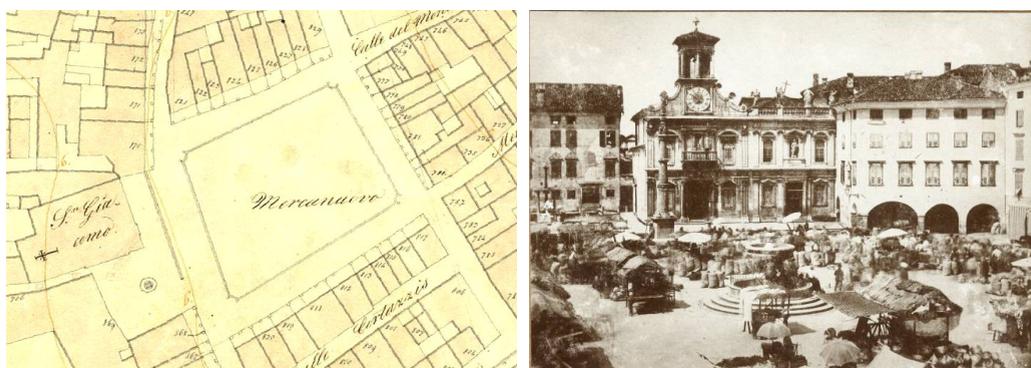


Figura 1. Pianta del catasto austriaco (a sinistra) e fotografia degli inizi del '900 (a destra).

Una delle peculiarità proprie della piazza è la marcatura, in gran parte ancora oggi esistente, di una serie di numeri e di simboli su alcune lastre, la cui funzione era la definizione dei posteggi e degli spazi assegnati ai mercanti con un’estrazione a sorte, in modo da evitare litigi e disaccordi.

Negli anni '70-'80 del secolo scorso, a causa delle condizioni di avanzato degrado dovuto al tempo, all’uso, al gelo e al transito di mezzi pesanti (carri), si rese necessario un riatto del plateatico lastricato. Tale intervento di manutenzione, effettuato nei primi anni '80, è consistito in:

- rimozione dei gradini perimetrali (sbrecciati, rotti e slittati dalla posizione originale), minima sostituzione con pezzi nuovi e rimessa in opera su zoccolo in calcestruzzo nella stessa posizione;
- rimozione dell’intero lastricato e sua rimessa in opera su letto di sabbia e cemento, previa la sostituzione delle lastre rotte e non più recuperabili con lastre della medesima tipologia, sebbene di spessore molto più ridotto rispetto alle originali.

Tutti gli interventi attuati, preventivamente decisi con la Soprintendenza, avevano l’obiettivo di sostituire il minor numero di pietre possibile: si è così provveduto all’incollaggio e alla chiodatura di un gran numero di lastre, cercando quindi di preservare il materiale originale.

Negli anni successivi la piazza ha continuato ad essere usata come sede del mercato settimanale e di varie manifestazioni fieristiche della città. Al tradizionale mercato giornaliero della verdura, della frutta e dei fiori, si aggiunse nei primi anni '90 anche il mercato del pesce. Tale scelta è risultata deleteria per la pavimentazione, sollecitata in continuazione dal peso dei trasporti, sempre più

consistenti, dalla presenza del ghiaccio e dell'acqua utilizzati dal mercato del pesce e dall'utilizzo indiscriminato di ponteggi e coperture provvisorie con elevati carichi puntuali. A inizio 2011, a causa delle numerose rotture di lastre, alla rimozione di alcune porzioni e alla presenza di cedimenti generalizzati del piano di posa, si è reso necessario delimitare alcune porzioni del plateatico e interdirle al passaggio dei pedoni. Dopo di che, è stato redatto un progetto di recupero, concordato con la locale Soprintendenza, per un improrogabile ripristino della pavimentazione della piazza.

2. Rilevamento TLS ex ante dello stato di fatto (aprile 2010)

Il primo rilevamento laser scanning della piazza è stato eseguito nel mese di aprile del 2010 ed è stato realizzato con il laser scanner terrestre (TLS) Riegl Z390i integrato con camera metrica Nikon D200 di proprietà del CIRMONT di Amaro (UD, www.cirmont.it), strumento pure utilizzato per il secondo rilevamento del 2012. In realtà le scansioni in oggetto sono state svolte principalmente per la modellazione delle interessanti facciate degli edifici prospicienti: pur tuttavia, questi dati hanno permesso di descrivere lo “stato di fatto della pavimentazione” prima del rifacimento (situazione *ex ante*). Sono state acquisite due scansioni panoramiche, una dal quadrante sud-ovest (in giallo in Figura 3 a sinistra) ed una da quello nord-est (in verde in Figura 3 a sinistra) per un totale di circa 6,7 milioni di punti; le loro caratteristiche principali sono riassunte in Tabella 2.

scansione	Tipo	passo angolare	punti totali	punti piazza	punti pavimentazione	immagini
Matteotti SO	verticale panoramica	0,10° x 0,10°	3,3 M	2,0 M	1,9 M	12
Matteotti NE	verticale panoramica	0,10° x 0,10°	3,4 M	1,9 M	1,8 M	12
TOTALE			6,7 M	3,9 M	3,7 M	24

Tabella 2. Caratteristiche del rilevamento TLS del 2010 (*ex ante* il restauro).

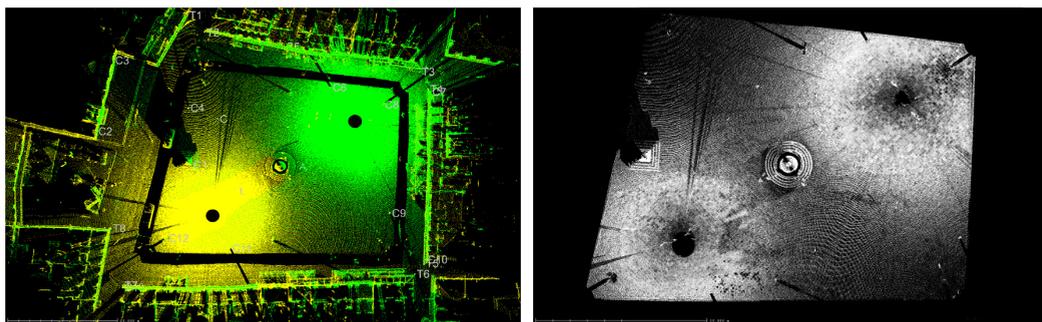


Figura 3. Le due scansioni TLS del 2010 (a sinistra) ed il solo plateatico per intensità (a destra).

Per la registrazione delle due scansioni sono stati sfruttati 21 punti, tra target riflettenti cilindrici (\varnothing 5 cm) e punti naturali, indicati in Figura 3 a sinistra: ricordando che l'oggetto del rilevamento erano gli edifici, la disposizione dei target non appariva certamente ottimale, visto che erano posti piuttosto in basso, in zone accessibili quali il lastricato stesso, la fontana, la base della colonna e l'esterno dei porticati. Sono stati scelti allora anche dei punti naturali, posti il più in alto possibile sulle facciate, negli spigoli delle grondaie e sui lampioni della piazza: il residuo medio della registrazione è risultato pari a 1,6 cm. Tale valore appare di per sé soddisfacente per creare i prospetti (verticali) delle facciate, non lo è invece per la modellazione della superficie “orizzontale” del plateatico (Figura 3 a destra) per il quale è richiesta una grande accuratezza altimetrica.

Il problema di fondo è dato dal fatto che le scansioni verticali sono ottimali per rilevare superfici verticali (le pareti) ma non per quelle orizzontali (la pavimentazione) essendo assai scorciate per la maggior parte di queste. Con lo strumento utilizzato, il raggio del punto più vicino al TLS ha una lunghezza di 2,77 m ed un angolo di incidenza di 40° sulla pavimentazione, mentre un raggio che colpisce la pavimentazione a (soli) 25 m di distanza, ha un angolo di incidenza di appena 4°.

In assoluto, il problema si risolve acquisendo molte scansioni e/o ruotando lo strumento verso il basso e/o posizionandolo “in alto”, operazione quest’ultima sempre assai difficile. Qui invece, si sono mantenute le scansioni a disposizione e si è seguita la strategia di elaborazioni sotto riportata, eseguite con il software RiSCAN PRO® (Riegl, 2009), salvo quando diversamente specificato.

1. Utilizzo dei soli punti della pavimentazione

Mediante selezione manuale, dalle due scansioni “Matteotti SO” e “Matteotti NE” (vedi Tabella 2) sono stati considerati rispettivamente 2,0 e 1,9 milioni di punti della sola piazza. Da questi, sono stati poi eliminati i punti, ben 200.000 circa, relativi alle persone che passeggiavano in piazza.

2. Ricampionamento “octree” delle due nuvole di punti

Come conseguenza agli angoli di incidenza molto bassi, le scansioni verticali avevano densità di scansione orizzontale assai variabile, passando da un massimo di 30.000 punti/mq per le aree più vicine al TLS, a “soli” 50 punti/mq sempre alla distanza di 25 m dal TLS. Per omogeneizzare tali densità è stato eseguito un filtraggio mediante metodo “octree”, algoritmo ben noto che restituisce il baricentro di tutti quelli compresi in un cubetto di dimensioni scelte. Trattandosi qui di una superficie “orizzontale”, si sono invece considerati dei parallelepipedi verticali di 10x10x100 cm, in modo da filtrare il rumore di misura, come già fatto in una situazione analoga, la scansione molto rumorosa di una trave di legno non verniciata, descritta in Crosilla et al. (2011).

3. Creazione del DSM delle due nuvole di punti ricampionate

Sono stati sperimentati due metodi di triangolazione 3D, TIN (*Plane triangulation*) e a griglia (*2,5D raster*), tenendo come riferimento il piano orizzontale 2D, con vari parametri di costruzione dei triangoli: massima lunghezza dei lati, massima pendenza, angolo minimo dei triangoli (per il TIN), passo della griglia e metodo di interpolazione (per la griglia). I risultati migliori si sono ottenuti con il metodo a griglia con un passo di 20 cm e posizionamento planimetrico con “*true average*”. Successivamente si proceduto alla chiusura dei “buchi” che si presentavano nelle parti lontane dal TLS mediante triangolazione piana, ammettendo triangoli con lati di lunghezza superiore. Costruiti così separatamente i due DSM, il loro confronto è un indice della bontà della registrazione su punti omologhi. La Figura 4 a sinistra riporta la differenza “DSM NE – DSM SO”, in direzione verticale, in scala di colori: il bianco significa che manca il DSM SO, il verde che la distanza è entro ± 1 cm; si nota che nella parte ovest, il DSM NE si trova circa 2 cm sopra al DSM SO (colore giallo-verde).



Figura 4. Differenza fra i DSM delle due scansioni prima (a sinistra) e dopo (a destra) la registrazione con metodo ICP: le aree colorate in verde hanno una differenza entro ± 1 cm.

4. Registrazione mediante metodo ICP

I risultati sopra descritti confermano la necessità di raffinare la registrazione mediante il ben noto metodo “*Iterative Closest Point*” ICP (Besl e McKay, 1992) che, minimizzando la distanza fra i DSM corrispondenti alle scansioni da registrare, procede a così a roto-traslare le stesse e quindi a migliorare la registrazione. Tale algoritmo non è disponibile nella versione base di RiSCAN PRO, ma è implementato, ad esempio, nel comando *Align* di MeshLab® (Visual Computing Lab - ISTI - CNR, 2011), software *open source* con svariate funzioni per l’elaborazione di *mesh*. Nel nostro caso

specifico, i due DSM sono stati importati in MeshLab e, tenendo fermo il DSM SO, il DSM NE è stato roto-traslato mediante metodo ICP. La nuova differenza “DSM NE – DSM SO” è ora riportata in Figura 4 a destra: è palese il miglioramento della sovrapposizione fra i due. I parametri di roto-traslazione della scansione “Matteotti NE” ottenuti mediante punti omologhi sono stati sostituiti con quelli così calcolati mediante ICP: in definitiva, dove era conveniente, è stato possibile utilizzare i punti TLS così come originariamente acquisiti, mentre nelle zone equidistanti dalle due stazioni di scansione, grazie al criterio imposto, l’integrazione fra le stesse è la migliore possibile.

5. Fusione dei due DSM in un’unica superficie

Tornando a considerare l’intero plateatico, dopo la registrazione ICP, le due scansioni/superfici sono molto più vicine fra loro ma non coincidono. Sempre all’interno di MeshLab, prima sono state fuse assieme con il comando *Flatten Visible Layers* e poi, per creare un unico DSM (Figura 5), è stato utilizzato il comando *Surface Reconstruction - VCG*, con opportuni parametri di modellazione.

6. Texturing del DSM con le immagini fotogrammetriche

Sul DSM così ottenuto sono state proiettate le immagini fotogrammetriche acquisite con la camera integrata con la produzione della pianta-ortofoto del lastricato: la sua qualità radiometrica purtroppo non è ottimale per le zone scorciate (quadranti nord-est e sud-ovest) rispetto alle prese/scansioni.

Eseguite le precedenti elaborazioni, si ha la rappresentazione dello stato di fatto del plateatico prima del restauro. Osservando la Figura 5 a sinistra, dove il DSM è colorato per quota da 108,93 m (blu) a 109,20 (rosso), si nota come nella parte sud-ovest vi fosse un’area con bassa pendenza, zona spesso luogo di ristagni d’acqua. Analizzando tale area in dettaglio, riportata in Figura 5 a destra con colori ora ristretti in un intervallo in quota di 7 cm, da 108,99 m (blu) a 109,06 m (rosso), si nota un’efficace rappresentazione della grande irregolarità altimetrica del lastricato che qui presentava cedimenti anche di qualche centimetro e pericolose lacune nelle lastre.

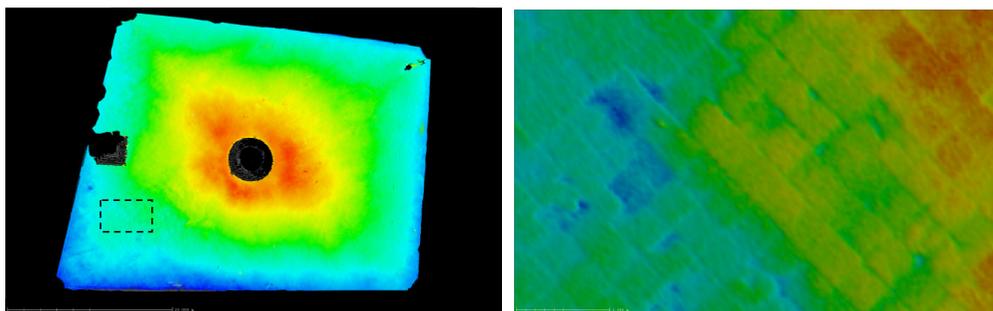


Figura 5. DSM 2010 colorato per quota (a sinistra) e dettaglio della zona sud-ovest (a destra).

3. L’intervento di rifacimento della pavimentazione (ottobre 2011 - aprile 2012)

Stante lo stato di elevato degrado, l’iter di progettazione per il recupero della piazza è stato portato a termine in tempi molto ristretti e in stretta collaborazione tra l’Amministrazione Comunale di Udine e la locale Soprintendenza per i Beni Architettonici e Culturali. L’intervento ha riguardato 6.060 (!) lastre della parte sud della piazza, la più ammalorata: nella pianta di Figura 6 a sinistra, ottenuta anche sulla base del rilevamento TLS appena descritto, sono indicate le lastre spezzate in 2-3 frammenti (in verde), quelle spezzate in 4-6 frammenti (in giallo), quelle da rimuovere e da ricollocare (in arancio), quelle da sostituire (in viola) ed i gradini da restaurare (in azzurro).

I lavori sono iniziati a metà ottobre 2011 e hanno avuto termine ad aprile 2012, prima di Pasqua, quando la piazza è stata inaugurata. Il lavoro è stato realizzato da due ditte distinte, una deputata alla rimozione delle lastre, alla sistemazione del sottofondo, alla posa delle lastre e alla successiva fugatura, mentre la seconda si è occupata del vero e proprio lavoro di restauro delle lastre rovinate. La parte soggetta ad intervento è stata divisa in 22 settori di lunghezza variabile e di larghezza pari a 5 lastre (vedi Figura 6 a destra), procedendo alla loro rimozione in fasi distinte. Ciò si è reso necessario per il vincolo di mantenere la posizione e l’orientamento delle lastre e l’andamento non

esattamente rettilineo delle linee di fugatura. Una volta rimosse, le lastre di ogni settore sono state numerate sequenzialmente e posate sul settore successivo, secondo l'ordine di rimozione.

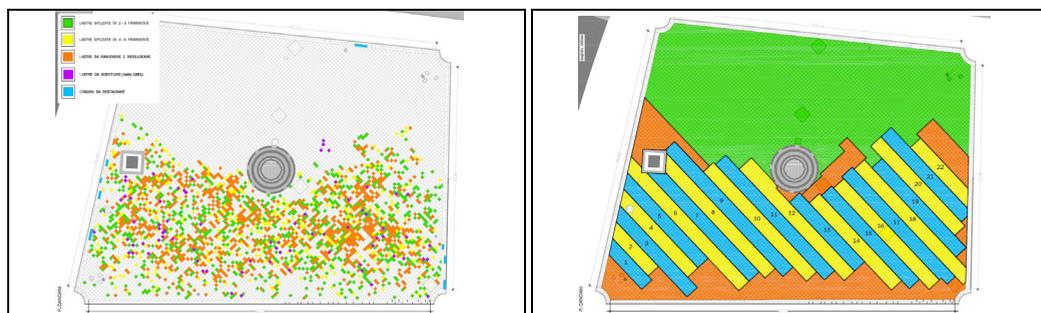


Figura 6. Lastre oggetto di restauro (a sinistra) e organizzazione del lavoro (a sinistra).

Le lastre irrecuperabili, ovvero quelle frantumate in un eccessivo numero di pezzi o quelle risalenti al recupero degli anni '80, sono state eliminate (percentuale inferiore al 5%). Le lastre recuperabili sono state prelevate dalla ditta di restauro che ha provveduto ad incollarle tramite resine epossidiche o a tassellarle con i residui delle lastre eliminate e poi a stuccarle con materiale ottenuto dalla frantumazione delle lastre eliminate. Le lastre eliminate sono state sostituite con nuove lastre in pietra piacentina di 41x41 cm, tagliate a piano di sega e sottoposte a fiammatura (per renderle più uniformi rispetto alle antiche) e di spessore uniforme pari a 8-10 cm, assai elevato, per resistere nel caso di eventuali carichi puntuali. Infine, le lastre integre sono state accantonate.

Particolare attenzione è stata prestata alle lastre numerate e con eventuali simboli, restaurando e preservando anche lastre che si trovavano ridotte in condizioni di fatto irrecuperabili. Le marcature degli stalli sono state prodotte con piastrelline in nero marquinia 6x6 cm e spessore 1 cm.

Se la planimetria del lastricato non doveva essere mantenuta pressoché inalterata, l'andamento altimetrico doveva invece soddisfare la corretta pendenza (livellata) per lo smaltimento delle acque meteoriche: come visto al paragrafo 4, gran parte delle lastre dovevano essere rimesse in posa ad una quota più alta. Il nuovo piano di posa è stato realizzato con un letto di sabbia di fiume mista a cemento, seguendo il tracciamento nei settori grazie a dei picchetti e ad accorgimenti di cantiere.

Infine si è provveduto alla rimozione e al restauro dei soli gradini che risultavano rovinati.

A conclusione dei lavori si è proceduto alla pulizia dell'intero plateatico tramite l'utilizzo di un processo di saponificazione che ha eliminato gli aloni e le macchie e alla successiva idropulitura.

4. Rilevamento TLS ex post dopo il rifacimento (aprile 2012)

Il secondo rilevamento TLS della piazza è stato eseguito un paio di settimane dopo l'inaugurazione del plateatico restaurato: anche in questo caso sono state eseguite due scansioni (vedi Tabella 7), acquisite però dagli altri due quadranti della piazza ("Matteotti NO" azzurra e "Matteotti SE" fucsia in Figura 8 a sinistra). Lo strumento è stato ruotato di 30° verso il basso in direzione della fontana (centro della piazza), visto che stavolta le facciate degli edifici non erano di interesse. Sono state comunque eseguite anche due scansioni verticali a minor densità (0,10°), per fissare la direzione verticale grazie ai valori memorizzati dal sensore di inclinazione del TLS, come si vedrà in seguito.

scansione	tipo	passo angolare	punti totali	punti piazza	punti pavimentazione	immagini
Matteotti NO	inclinata 30° panoramica	0,06° x 0,06°	7,0 M	3,5 M	2,9 M	12
Matteotti SE	inclinata 30° panoramica	0,06° x 0,06°	6,9 M	3,4 M	2,8 M	12
TOTALE			13,9 M	6,9 M	5,7 M	24

Tabella 7. Caratteristiche del rilevamento TLS del 2012 (ex post il restauro).

Potendo disporre di 40 target cilindrici, anche di diametro 10 cm e ideali per essere posti a grande distanza dal TLS, la registrazione sugli stessi ha fornito un residuo medio di 1,0 cm, valore migliore rispetto a quello del 2010 e più significativo essendo i target posti tutti sulla piazza. Sono state

eseguite le elaborazioni 1, 2, 3, 5 e 6 descritte al paragrafo 2, ma non il raffinamento della registrazione (4) via ICP in quanto la differenza fra i due DSM era in gran parte compresa entro ± 1 cm. Va detto che in questo caso, vista la maggior risoluzione di scansione (passo angolare ridotto a $0,06^\circ$), la densità orizzontale a 25 m era pari a 110 punti/mq, valore più che accettabile. In Figura 8 a destra è rappresentato il DSM ottenuto, con colori secondo la quota: ricordando il DSM del 2010 (Figura 5 a sinistra), si può qui notare la miglior omogeneità delle variazioni di quota (pendenza).

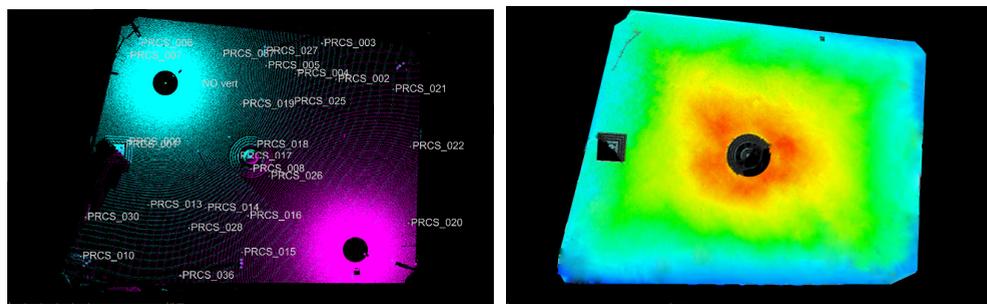


Figura 8. Le due scansioni TLS del 2012 (a sinistra) ed il DSM colorato per quota (a destra).

5. Confronto fra il DSM 2010 e il DSM 2012

Il confronto fra i DSM *ex ante* ed *ex post* il restauro presuppone che gli stessi si trovino nello stesso sistema di riferimento (PRoject Coordinate System, PRCS), situazione non vera in quanto l'origine del PRCS del rilevamento del 2010 era la scansione "Matteotti SE", mentre quella del rilevamento 2012 era la scansione "Matteotti NO", in entrambi i casi rese matematicamente verticali con il comando "Calculate via inclination sensors" a partire dai dati dell'inclinometro.

Di fatto, si è trattato di eseguire ancora una registrazione, stavolta non fra scansioni, bensì fra rilevamenti TLS. A tal fine, si è proceduto ad una roto-traslazione manuale del DSM 2012 sul DSM 2010 sulla base di 10 punti fissi nelle due epoche, quali la sommità della fontana, alcuni spigoli della base della colonna, dei lampioni e di elementi di arredo urbano. È stato ottenuto un residuo medio pari a 1,8 cm, valore soddisfacente tenendo conto che si è operato su punti naturali.

Il successivo raffinamento mediante metodo ICP ha portato a risultati peggiori: il motivo sta nel fatto che, nel rifacimento, la parte sud della piazza è stata rialzata e quindi il criterio di minimizzare ai minimi quadrati la distanza fra i DSM determina una errata roto-traslazione del DSM 2012.

L'analisi della differenza ottenuta fra i DSM *ex ante* ed *ex post* (Figura 9) fornisce contributi significativi soltanto se tale differenza è stata correttamente calcolata: nel nostro caso, i due rilevamenti avrebbero dovuto essere georeferenziati su caposaldi opportunamente materializzati e misurati per via topografica. Così facendo, la differenza fra i due modelli digitali avrebbe fornito un miglior controllo delle variazioni intervenute; pur tuttavia, anche questa comparazione "senza appoggio topografico" ha portato a delle valutazioni interessanti, riportate al paragrafo successivo.

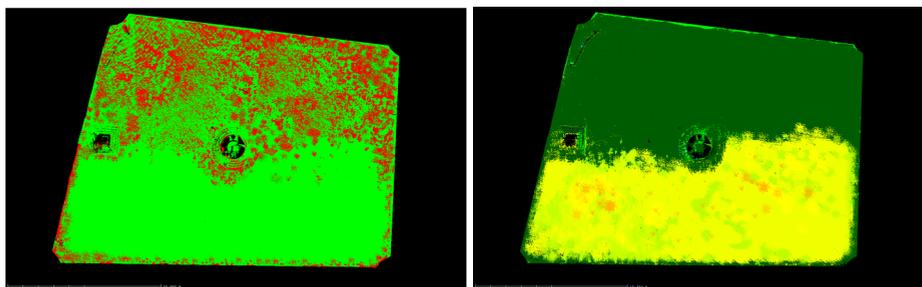


Figura 9. "DSM 2012 vs DSM 2010": DSM 2012 in verde e DSM 2010 in rosso (a sinistra); la differenza rappresentata per colori: nelle aree verdi essa è compresa entro ± 1 cm (a destra).

6. Controllo del rifacimento della pavimentazione

La Figura 9 a sinistra conferma l'innalzamento della quota di gran parte della zona sud, che nella Figura 9 a destra è quantificabile pari a quasi 10 cm nelle aree che erano particolarmente basse.

Come esempio di maggior dettaglio, la Figura 10 riporta due aree contigue di pavimentazione, a sinistra nella situazione del 2010 e a destra in quella del 2012; i due DSM sono così rappresentati:

- a sinistra, a colori in base alla variazione di quota, pari a 10 cm in tali aree, quindi da 0 cm (blu) a +10 cm (rosso): si nota subito come qui le lastre nel 2012 si trovino 7 cm circa più in alto;
- a destra, a toni di grigio in base all'intensità riflessa, quindi in funzione del materiale colpito, ma equalizzata sul *range* locale: si nota che le intensità sono ovviamente diverse nei due rilevamenti.

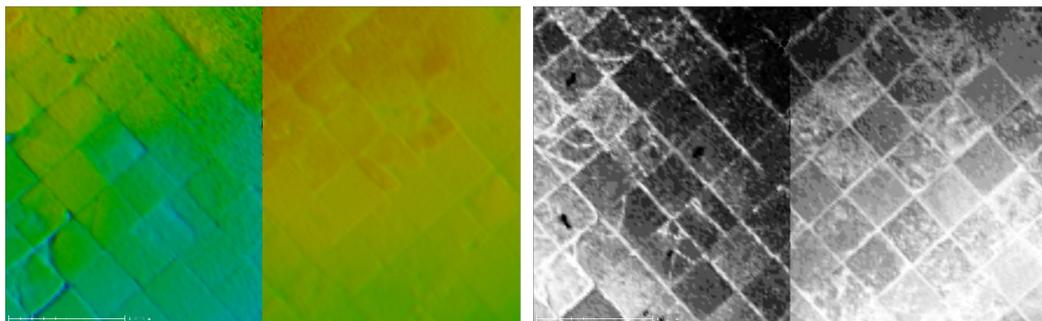


Figura 10. Aree contigue nel 2010 e nel 2012, per quota (a sinistra) e per intensità (a destra).

Sulla base di tutto quanto visto finora, il controllo del rifacimento porta alle seguenti conclusioni:

- l'intervento di rifacimento, grazie al consolidamento del sottofondo e alla stesa di nuovo materiale, ha permesso la correzione degli avvallamenti dell'area sud-ovest della piazza, ove maggiormente si era verificato il fenomeno di accumulo di acqua e di lastre lesionate, l'innalzamento medio del piano di calpestio risulta pari a 8 cm (Figura 9 a destra);
- il plateatico più regolare è maggiormente fruibile all'utenza e permette il corretto defluire delle acque e il conseguente mantenimento del sottofondo, che non viene più trasportato e rimosso;
- l'andamento planimetrico delle fughe è stato mantenuto nel suo particolare andamento ondulatorio e questa verifica particolare è stata possibile solo grazie alla sovrapposizione del DSM 2012 sul DSM 2010, texturizzato con le immagini o semplicemente rappresentato per intensità come in Figura 10 a destra, dove è sorprendente la continuità planimetrica riscontrata.

7. Conclusioni

Attraverso questo articolo si sono studiate le problematiche e le potenzialità del controllo del rifacimento di una pavimentazione di una piazza mediante rilevamenti laser scanning *ex ante* ed *ex post* l'intervento. Grande attenzione deve essere posta nelle scansioni, vista la giacitura orizzontale della superficie, nella loro registrazione delle scansioni e nel corretto allineamento/confronto fra i rilevamenti. Nonostante nel presente lavoro non si siano utilizzati caposalda fissi, il confronto fra i modelli conferma la modifica altimetrica e l'invarianza planimetrica del rifacimento in esame.

Bibliografia

- Besl P.J., McKay N.D. (1992), "A method for registration of 3-D shapes", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14: 239-256.
- Crosilla F., Gubana A., Visintini D. (2011), "Misura delle deformazioni di elementi strutturali lignei con laser scanner terrestri distanziometrici". *Geomatica: le radici del futuro. Tributo a Sergio Dequal e a Riccardo Galetto*, Edizioni SIFET, Mestre, 219-228.
- Della Porta G.B., (1928), *Toponomastica storica della città e del comune di Udine*, Borsetti, Udine.
- Riegl (2009), "Operating&Processing Software RiSCAN PRO for Riegl 3D Laser Scanners - v1.5.0sp1".
- Visual Computing Lab - ISTI - CNR (2011), "MeshLab - v1.3.1.", <http://meshlab.sf.net>.