

Rilievo 3D e monitoraggio strutturale per l'analisi post-sisma del complesso di S. Nicola a Tolentino (MC)

Daniele Costanzo^(a), Filiberto Chiabrando^(b), Renato Lancellotta^(a),
Andrea Lingua^(c), Antonino Quattrone^(a), Donato Sabia^(a), Antonia Spanò^(b)

(a) Politecnico di Torino DISEG, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino,
daniele.costanzo@polito.it, renato.lancellotta@polito.it, antonino.quattrone@polito.it,
donato.sabia@polito.it

(b) Politecnico di Torino DAD, Viale Mattioli 39, 10125, Torino,
filiberto.chiabrando@polito.it, antonia.spano@polito.it

(c) Politecnico di Torino DIATI, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino,
andrea.lingua@polito.it

Abstract

La sequenza sismica che ha gravemente colpito le zone del centro Italia a partire dal 24 Agosto 2016 ha mosso l'attenzione della comunità scientifica su molteplici tematiche legate agli aspetti che riguardano la salvaguardia del territorio e del patrimonio costruito che su di esso insiste.

L'estensione delle aree colpite è risultata particolarmente ampia e ha richiesto analisi alle diverse scale per osservare il territorio, i contesti urbani e le loro caratteristiche. Particolarmente efficace è risultata la raccolta di dati dai satelliti ad alta risoluzione, in grado di fornire in tempo reale immagini per la definizione di una cartografia speditiva mirata all'immediata organizzazione dei soccorsi, fino all'esecuzione di rilievi fotogrammetrici a grandissima scala realizzati con sistemi UAV, terrestri o LiDAR, necessari per un'analisi completa del beni architettonici.

In questo scenario si riportano nel presente articolo le operazioni di rilievo metrico 3D e i primi risultati del monitoraggio strutturale, effettuati dai gruppi di ricerca di Geomatica e di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del Politecnico di Torino sulla Basilica di San Nicola a Tolentino (MC). Le operazioni di rilievo e la contestuale installazione del sistema di monitoraggio sono state intraprese subito dopo l'evento con epicentro Ussita (26 Ottobre M.5.9), che ha gravemente danneggiato la struttura della fabbrica, suggerendone la chiusura al pubblico.

I primi risultati derivati dal confronto tra il rilievo dell'assetto geometrico delle strutture e il comportamento registrato dal sistema di monitoraggio (che ha raccolto dati di grande interesse anche a seguito dell'ulteriore scossa del 27 Aprile 2017 M. 4.0) hanno messo in evidenza le criticità della struttura, come descritto nel seguito.

Introduzione

A seguito degli eventi sismici che hanno colpito l'Italia centrale a partire dal 24 Agosto 2016 il Politecnico di Torino ha istituito sotto il coordinamento del Prof. Sebastiano Foti una task force multidisciplinare per l'analisi e la documentazione delle aree colpite a supporto degli attori coinvolti

nell'emergenza. In tale scenario si inserisce l'esperienza sulla Basilica di San Nicola a Tolentino, sulla quale sono partite una serie di operazioni mirate all'analisi dello stato di conservazione della fabbrica sia dal punto di vista geometrico, sia strutturale. Le operazioni condotte hanno riguardato gli aspetti legati al monitoraggio dinamico e quelli finalizzati alla ricostruzione geometrica 3D dell'intera Basilica grazie all'utilizzo di tecniche geomatiche. In questa fase del processo di documentazione ed analisi si inserisce l'esperienza condotta dal team DIRECT (DISaster RECOVERY Team) del Politecnico di Torino, al quale partecipano anche un certo numero di allievi.

Il progetto DIRECT nasce nel 2012 e ha per obiettivo l'istituzione di una formazione studentesca che opera nel campo del Rilevamento Metrico 3D, del Telerilevamento, della predisposizione di cartografia e di sistemi WebGIS. Tale formazione è attiva in tutte le fasi del Disaster Management (DM), dall'analisi della vulnerabilità ambientale, alla risposta immediata alle emergenze, al rilievo post disastro, passando attraverso la fase di Capacity Building (CB), ossia della formazione degli operatori all'intervento diretto. Oggetto dell'iniziativa sono tutte quelle fasi in cui l'acquisizione di dati relativi al territorio e al patrimonio costruito è di fondamentale importanza in occasione di emergenze ambientali (dovute sia a fenomeni naturali catastrofici, da eventi di natura antropica, che a crisi umanitarie), oppure destinata ai beni soggetti a emergenze anche ordinarie continue (Beni architettonici, archeologici, paesaggistici).

Nello specifico, le attività di documentazione metrica 3D svolte sull'area del convento e della Basilica di San Nicola hanno avuto la duplice finalità di ribadire il valore storico-culturale e identificativo insito nella salvaguardia del patrimonio tramite un'esperienza diretta. In secondo luogo la lettura analitica della fabbrica ed il conseguente modello 3D denso sono comparati e collaborano ad arricchire l'indagine strutturale realizzata mediante monitoraggio dinamico, finalizzato a evidenziare elementi di criticità e quindi di vulnerabilità, come pure la loro evoluzione nel tempo. Gli obiettivi formativi del progetto ampliano il raggio d'azione alla collaborazione interdisciplinare e i risultati sono a disposizione delle diverse Istituzioni.

La Basilica ed il convento di San Nicola a Tolentino

Quando nel 1275 i superiori del nuovo Ordine mendicante inviarono in questo luogo fra Nicola da Castel Sant'Angelo (diventato poi san Nicola da Tolentino), il convento era già ben organizzato nella sua vita interna e possedeva le strutture esterne essenziali: un edificio per l'abitazione di un certo numero di religiosi e un oratorio ove questi potessero esercitare l'apostolato liturgico, confessionale e della predicazione. Ne costituisce documento non solo la vita di San Nicola, ma anche una donazione ricevuta nel 1284 dal convento. Un importante rinnovamento della chiesa venne con l'insediamento della Congregazione di Lombardia. Nel 1485 si parla subito del disegno e del preventivo di spese per la nuova chiesa; nel 1503 venne terminata la costruzione della navata centrale e, dal 30 luglio al 29 settembre, si realizzarono le nuove cappelle laterali e le sepolture lungo il fianco sinistro (Nord) per mano del maestro comacino Antoniolo (AA.VV, 2008). Dopo alterne vicende e interventi, l'odierna immagine architettonica dell'interno della chiesa

è il frutto dei significativi interventi di restauro condotti dal 1856 al 1859 dall'architetto fermano Giambattista Carducci (1806-1878). Oltre l'aula principale con l'interessante soffitto a cassettoni ligneo ed il convento (indagato solo parzialmente durante i rilievi) sono stati analizzati e rilevati in dettaglio anche il chiostro ed il Cappellone di San Nicola. Si è in presenza di uno degli ambienti più interessanti, caratterizzato da una grande aula voltata decorata da affreschi dei primi anni del Trecento ad opera della scuola di Pietro da Rimini. A causa dei danni subiti durante gli eventi sismici non è stato possibile analizzare la facciata principale della Basilica, portata a compimento a partire dal XV secolo ad opera di Nanni Di Bartolo. In questo momento il fronte è totalmente obliterato da un'impalcatura coperta da teli.



Figura 1 - Vista Aerea della Basilica di San Nicola e dell'adiacente convento (sx).
Vista interna del Cappellone di San Nicola (centro) e della Basilica (dx).

Il Rilievo metrico 3D ed i principali elaborati realizzati

La campagna di rilievo realizzata ha previsto l'utilizzo sia di strumentazione topografica tradizionale (Total Station, GPS/GNSS), sia di sistemi *image-based* e *range-based* di ultima tecnologia. Tra i sistemi *image based* è stato sperimentato l'utilizzo di UAV, sistemi imaging 360° (GOPRO ring) e *steadycam* stabilizzate (DJI Osmo). Per quel che riguarda invece i metodi *range-based*, oltre all'utilizzo di strumenti a scansione Laser Terrestre è stato utilizzato un sistema SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) per valutare le grandi opportunità offerte da queste tecnologie emergenti nel caso di rilievi speditivi dei Beni Culturali e del territorio. I metodi utilizzati sono stati in grado di garantire un'acquisizione completa della struttura (figura 2), la loro integrazione si è delineata anche occasionalmente come sovrapposizione in modo da validare i metodi più innovativi

Seguendo il tradizionale *work-flow* dei rilievi metrici 3D, il primo e fondamentale aspetto affrontato ha riguardato la realizzazione della rete topografica di inquadramento. Dovendo affrontare una documentazione completa (interno/ esterno), per consentire il riferimento reciproco di tutte le acquisizioni del rilievo 3D e per garantire la georeferenziazione di tutti i prodotti derivati (ortofoto, modelli 3D), è stato seguito un approccio misto che ha previsto la realizzazione di una rete con tecnica GPS/GNSS nella parte

esterna al complesso, mentre nella parte interna è stato eseguito un raffittimento topografico con vertici misurati mediante tecnica classica – Stazione Totale).

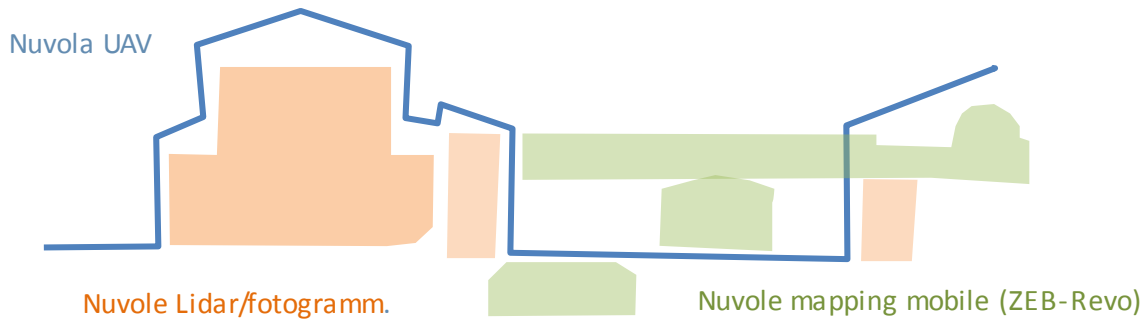


Figura 2 –Schema dell'approccio seguito con relativi metodi aerei e terrestri.

Seguendo l'approccio riportato in figura 2 la prima fase di acquisizione di dati di dettaglio è stata realizzata con l'utilizzo di sistemi UAV. Si è previsto di procedere con l'utilizzo di un drone commerciale a basso costo ampiamente utilizzato nelle applicazioni: il DJI Phantom 4 PRO (Anurogo et al., 2017; Chen et al., 2016). Gli schemi di volo impiegati sono quelli attualmente riconosciuti più efficaci in presenza di patrimonio costruito, cioè prevedono oltre l'acquisizione di immagini nadirali (asse della camera perpendicolare al terreno) anche l'utilizzo di immagini acquisite con l'asse di presa inclinato a circa 45° rispetto al terreno. Infine agli schemi di strisciate tradizionali, sono state integrate strisciate di immagini lungo percorsi circolari (Chiabrando et al., 2017; Aicardi et al., 2016). I ricoprimenti longitudinali e trasversali progettati sono stati elevati (> 70 %) in quanto idonei per l'impiego del processo di *SfM* (*Structure from Motion*) ed ormai di comune utilizzo per elaborazioni fotogrammetriche legate al rilievo dei Beni Culturali (Bitelli et al., 2017). Tutto ciò ha consentito una buona documentazione delle strutture sia in planimetria che in elevato, secondo la pianificazione del rilievo collaudata (figura 3).



Figura 3 –Schema di una porzione della rete di inquadramento principale e secondaria integrate (sx). Nuvola di punti ricavata grazie al processo fotogrammetrico dai dati acquisiti sulla Basilica ed il suo intorno (centro). Alcuni elaborati prodotti: DSM densificato (dx alto), ortofoto (dx basso).

La fase successiva è relativa alle acquisizioni terrestri, che sono state condotte con strumentazione ormai di comune utilizzo per i rilievi 3D del patrimonio costruito, quali laser scanner terrestre e fotogrammetria close-range, sperimentando nuovi sensori *low-cost* per l'acquisizione video/immagini non convenzionali. Ad esempio il ring della GOPRO, che consente di realizzare video 360° oppure *steadycam* stabilizzate quale l'OSMO della DJI (figura 4) dalle cui immagini e video sono stati estratti, mediante i consueti metodi di fotogrammetria basata su algoritmi SfM, prodotti utili alla documentazione metrica degli oggetti acquisiti (figura 5). (Calantropio et al., 2017)



Figura 4 - Immagini orientate del soffitto a lacunari lignei settecentesco della Basilica di San Nicola acquisite con DJI Osmo e vista del modello 3D shaded e texturizzato (dx). Al centro (in alto) DJI OSMO e (in basso) Ring GOPRO (Kolor) utilizzato per l'acquisizione di immagini e video 360° per la realizzazione di prodotti 3D.

Infine sono state sperimentate le potenzialità dei nuovi strumenti basati su tecnologia SLAM tra i quali il sistema ZEB-Revo (Nocerino et al., 2017). Tale sistema è in grado di acquisire informazioni 3D in movimento grazie all'utilizzo del laser scanner (Hokuyo UTM-30LX-F, <https://www.hokuyo-aut.jp/>) integrato al sistema INS/IMU; l'utilizzo di vincoli geometrici dell'ambiente ritratto ed un processo di registrazione cloud to cloud consente di ottenere la nuvola dello spazio percorso. E' possibile ottenere nuvole di punti registrate dell'oggetto ripreso eseguendo acquisizioni in movimento sia in ambienti esterni che interni (figura 5). La fase di registrazione è in questo momento realizzata in post-processing con il software proprietario, è prevista nei prossimi mesi la nuova release del software e dello strumento che consentiranno tale fase in *real-time*.

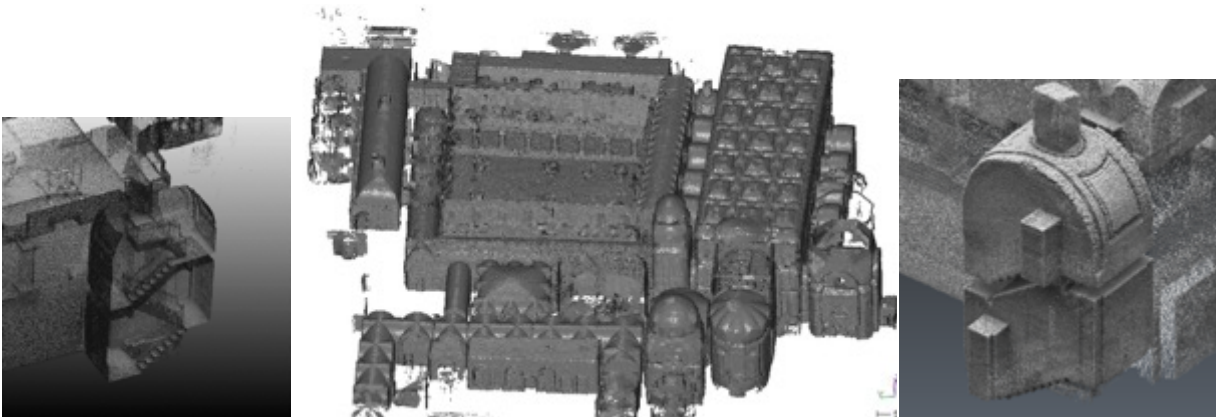


Figura 5- Porzioni di nuvole e somma di una serie di nuvole acquisite sull'intero complesso di San Nicola impiegando il sistema di mapping mobile della Geo-Slam.

Le elaborazioni portate a termine in queste prime fasi hanno consentito di ottenere delle nuvole di punti 3D complete esterno-interno grazie all'unione dei dati acquisiti con i sistemi UAV a quelli relativi al Laser scanner o altri sensori sperimentati durante le operazioni di rilievo (figura 6). Tale operazione è possibile grazie al fatto che tutte le elaborazioni sono riferite ad un unico sistema di coordinate realizzato con la creazione della rete GNSS e mediante stazione totale.



Figura 6- A sinistra nuvole di punti laser scanning (Focus 3D), acquisite e registrate per il rilievo della parte interna della chiesa di San Nicola. (centro) Vista di una sezione trasversale della nuvola di punti interno/esterno. Pianta del livello terreno della Basilica (scala originale 1:50)

La parte di lettura architettonica e relativa rappresentazione è stata eseguita a partire da questi dati ed ha consentito di estrarre le tradizionali viste in proiezione ortogonale utili alla generazione degli elaborati 2D utilizzati per la documentazione del patrimonio costruito, premessa indispensabile per le analisi legate allo stato di conservazione della fabbrica e la definizione di interventi, rispettosi dell'integrità storica del manufatto.

Molte elaborazioni relative all'ulteriore estrazione di rappresentazioni tradizionali e modelli 3D su numerose porzioni di interesse dell'intero complesso sono in parte realizzate e in parte corso (Cappellone, Cripta, Chiostro). L'oggetto di interesse maggiore è attualmente la definizione dei modelli 3D delle diverse porzioni per le analisi strutturali, mediante ad esempio modelli numerici agli elementi finiti (FEM). Le simulazioni sono basate sui dati di monitoraggio dinamico disponibili, acquisiti grazie al sistema installato nella Basilica e descritto nel successivo paragrafo.

Il Sistema di monitoraggio Dinamico

Gli eventi sismici susseguitisi dall'Agosto 2016 hanno causato come già precedentemente evidenziato rilevanti danni alla basilica. A partire dall'esame visivo, successivamente confermato dalle analisi eseguite sui modelli 3D, è sembrato quindi opportuno provvedere all'installazione di un sistema di monitoraggio dinamico. Il sistema installato è costituito da 20 accelerometri

monoassiali capacitivi, di cui 17 installati sulle strutture portanti lungo gli assi principali della Basilica e 3 alla base della torre campanaria, assunti come terna accelerometrica di riferimento al suolo. In Figura 7 si riportano le posizioni e i versi di misura dei sensori accelerometrici. Il sistema è completato da tre termocoppie per la misura delle temperature interne, nella navata e nel sottotetto, ed esterna. Il sistema installato non è invasivo e potrà rimanere in funzione sia durante gli interventi sulla struttura che durante il normale utilizzo della stessa. Lo scopo principale è quello di acquisire il comportamento dinamico globale e dei macroelementi principali costituenti il corpo centrale della Basilica (facciata, navata, abside, torre campanaria), danneggiati durante la sequenza sismica, in modo da valutare l'attivazione o l'evoluzione dei meccanismi di danno individuati (Sabia et al., 2017).

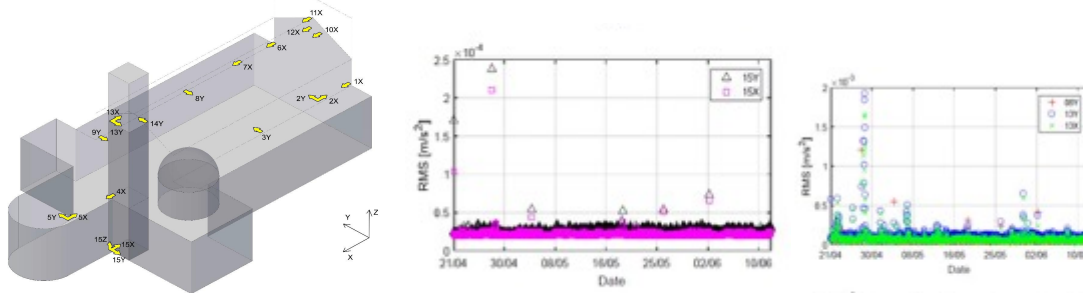


Figura 7 A sinistra lo schema del sistema di monitoraggio. Posizione dei sensori accelerometrici (in giallo) e delle termocoppie (in rosso). A destra l'analisi dei dati monitorati. Valore efficace valutato con cadenza oraria sui segnali registrati sulla struttura (centro) e alla base (dx).

I dati acquisiti in continuo permettono di individuare intervalli temporali in cui la risposta del sistema si discosta da un andamento assumibile come normale. La Figura 7 riporta inoltre la risposta efficace (RMS) delle accelerazioni acquisite nelle prime nove settimane sia sulla struttura che alla base. L'andamento mette in evidenza la risposta ad eventi puntuali, corrispondenti ad esempio agli eventi sismici del 27/04 aventi magnitudo 4 ed epicentri a Visso (MC). Il valore efficace delle risposte risulta essere un parametro sintetico efficace per controllare la risposta della struttura nel tempo e individuare delle soglie di riferimento. La realizzazione di modelli numerici opportunamente corretti sulla base dei dati sperimentali potrà consentire la definizione di opportune soglie di riferimento in funzione della risposta misurata (Sabia et al., 2015). La rappresentazione nel dominio tempo/frequenza permette di seguire l'evoluzione nel tempo delle frequenze naturali dei principali modi di vibrare.

Conclusioni e prospettive future

Nell'articolo sono riportate le prime esperienze condotte sulla Basilica di San Nicola a Tolentino, che ha subito significativi danni a seguito degli eventi sismici dello scorso anno. Le sperimentazioni svolte dal Team DIRECT hanno permesso di ottenere una grande mole di dati con le più moderne tecnologie legate al campo della Geomatica, a partire dalle quali sono tuttora in corso elaborazioni di modelli 3D e rappresentazioni utili alla documentazione e

conoscenza della fabbrica. Parallelamente alle fasi di descrizione geometrica si è avviata una campagna di monitoraggio strutturale utile per conoscere l'effettivo stato di salute della fabbrica e documentarne il comportamento nel tempo, considerato lo sciame sismico ancora in atto. L'esperienza, oltre alle suddette finalità legate alla conservazione del bene, è stata anche inserita in un programma di formazione didattica degli allievi del Politecnico di Torino che intendono sperimentare sul campo applicazioni che solitamente vengono affrontate esclusivamente con l'ausilio di lezioni in aula. Gli studi sull'area investigata sono in fase di continuo sviluppo e stanno proseguendo nella direzione della creazione di un archivio 3D completo, multi-scala e multi-contenuto, su cui basare diagnosi e progetti di intervento sulla fabbrica, nel rispetto dei principi fondanti della conservazione: minimo intervento, reversibilità, compatibilità, in modo che la salvaguardia sia coniugata con la necessità di preservare l'integrità storica del bene, nella sua accezione più ampia.

Riferimenti bibliografici

Anurogo, W., Lubis, M. Z., Khoirunnisa, H., Hanafi, D. S. P. A., Rizki, F., Surya, G., Dewant, N. A. (2017). "A Simple Aerial Photogrammetric Mapping System Overview and Image Acquisition Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)". *GEOSPATIAL INFORMATION*, 1 (1).

Calatropio, A, Patrucco G., Sammartano G, Teppati Losè, L., (2017), Low-Cost sensors for rapid mapping of Cultural Heritage: first tests using a COTS Steadicamera, SIFET.

Sabia, D., Aoki , Costanzo, D.,Lancellotta, R., Quattrone, A. (2017). " Post-earthquake dynamic monitoring of Basilica of St. Nicholas of Tolentino". Proceedings *ANIDIS 2017*.

Chiabrandò, F., Lingua, A. M., Maschio, P. F., Teppati Losè, L. (2017). The influence of flight planning and camera orientation in UAVs photogrammetry. A test in the area of Rocca San Silvestro (LI), Tuscany". *ISPRS ARCHIVES*, 42.

Bitelli, G., Dellapasqua, M., Girelli, V. A., Sanchini, E., & Tini, M. A. (2017). 3d geomatics techniques for an integrated approach to cultural heritage knowledge: the case of San Michele in Acerboli's church in Santarcangelo di Romagna, *ISPRS ARCHIVES*, 42.

Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Toschi, I., Rodríguez-González, P. (2017). Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems. In *Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV* (Vol. 10332, p. 103320I). International Society for Optics and Photonics.

Chen, S., F Laefer, D., Mangina, E. (2016). "State of technology review of civilian UAVs". *Recent Patents on Engineering*, 10(3), pp. 160-174.

Aicardi, I., Chiabrandò, F., Grasso, N., Lingua, A. M., Noardo, F., Spanò, A. (2016). "UAV photogrammetry with oblique images: First analysis on data acquisition and processing". *ISPRS ARCHIVES*, 41, pp. 835-842.

Sabia D., Aoki T., Cosentini R.M., Lancellotta R., (2015). "Model Updating to Forecast the Dynamic Behavior of the Ghirlandina Tower in Modena, Italy". *Journal of Earthquake Engineering*, 19 ,pp. 1-21.

AA.VV. (2008). "La Basilica Di San Nicola a Tolentino. Guida all'arte e alla storia" a cura del Centro studi Agostino Trapè. Tecnostampa Trullo – Roma.

