

SCANSIONE LASER 3D: TECNOLOGIA AL SERVIZIO DELLA TUTELA DEI BENI CULTURALI

di P. Tiziana Caudullo



Fig. 1 - Le attività di scansione della formella originale con cui Lorenzo Ghiberti partecipò e vinse il concorso indetto dall'Arte di Calimala per la produzione della Porta Nord del Battistero.

Nel 2012 è stato avviato il progetto per il restauro e la musealizzazione della Porta Nord del Battistero di Firenze, poi concluso nel 2015. Il progetto ha coinvolto numerosi soggetti del territorio e ha previsto l'uso di tecnologie innovative, quali la scansione laser 3D, la ricostruzione 3D e la produzione additiva.

Il Battistero di San Giovanni, posto di fronte alla Cattedrale di Santa Maria del Fiore a Firenze, è una delle Chiese più antiche della città. Il monumento a pianta ottagonale visibile oggi è infatti frutto dell'ampliamento di una struttura primitiva risalente al IV-V secolo. A partire dal 1157, la cura e il patronato del Battistero passarono nelle mani dell'Arte dei Mercatanti o di Calimala, una delle Arti Maggiori tra le corporazioni di arti e mestieri di Firenze. Proprio all'Arte di Calimala si deve il merito di aver impreziosito il Battistero con le tre Porte.

La più antica è la Porta Sud, realizzata da Andrea Pisano tra il 1330 e il 1336, sulla quale sono raffigurati gli episodi della vita del Battista e le Virtù cristiane. La seconda in ordine cronologico fu la Porta Nord: prodotta tra il 1402 e il 1424 da parte di Lorenzo di Bertoluccio Ghiberti detto *Nencio*, vincitore del concorso indetto dall'Arte di Calimala a soli 23 anni, è considerata l'opera che ha definito l'inizio del Rinascimento a Firenze. La Porta del Paradiso infine, le cui lavorazioni furono invece commissionate in modo diretto nel 1425 allo stesso Lorenzo Ghiberti, fu realizzata in ben 27 anni, tra il 1425 e il 1452.

Attualmente le tre Porte originali sono conservate all'interno del Museo dell'Opera del Duomo, nel quale sono state poste in seguito ai lavori di restauro. È proprio all'interno del piano di musealizzazione delle Porte che si è inserita l'azione oggetto del presente articolo. Difatti, al fine della sostituzione della Porta Nord originale con la replica da montare sul Battistero, si sono resi necessari interventi che contemplassero l'uso di tecnologie 3D: dalla scansione 3D per ottenere il rilievo alla stampa additiva per la produzione delle repliche.

IL PROGETTO

Il progetto finalizzato al restauro e alla sostituzione della Porta Nord di Lorenzo Ghiberti del Battistero di Firenze è stato avviato nel corso del 2012 per essere poi concluso nel settembre 2015, quando l'originale è stato trasferita all'interno del Museo dell'Opera del Duomo.

L'ideatore dell'iniziativa è Enrico Marinelli, l'allora presidente della *Galleria Frilli* e fondatore e presidente della *Guild of the Dome*, associazione senza scopo di lucro fondata nello stesso 2012 con lo scopo di promuovere il coinvolgimento del settore privato nei confronti dell'arte e della cultura; l'iniziativa è stata promossa unitamente all'Opera di Santa Maria del Fiore, la storica istituzione che sovrintende la cattedrale di Santa Maria del Fiore, la Cupola del Brunelleschi, il Battistero di San Giovanni, il Campanile di Giotto, la chiesa di Santa Reparata e il Museo dell'Opera del Duomo. L'attività a livello internazionale della *Guild of the Dome* ha permesso di finanziare l'intera operazione.

A coordinare e definire le attività di rilievo, ricostruzione 3D e di produzione tramite tecnologia additiva, Daniele Montani e Filippo Susca, poi fondatori, insieme proprio a Marinelli e alla *Galleria Frilli*, della start up innovativa *Syde srl*. La fusione in bronzo delle repliche delle formelle è stata invece realizzata dalla fonderia *Ciglia&Carrai*.

Come anticipato, l'azione ha rappresentato il primo passo di un progetto più ampio che ha portato al restauro, alla replica e alla musealizzazione della Porta Nord e della Porta Sud, vale a dire delle due Porte originarie che nel 2012 erano presenti sul Battistero.

Il progetto di musealizzazione dell'Opera del Duomo prevedeva di racchiudere in una unica sala espositiva (allestita nella nuova ala del Museo, inaugurata nel 2015) le tre Porte del Battistero: la Porta del Paradiso, rimossa dalla sua sede originale nel 1990 e riportata allo splendore originale dopo un complesso lavoro di restauro, durato ben 27 anni; la Porta Nord oggetto del presente articolo; la Porta Sud di Andrea Pisano, sostituita anch'essa con una replica realizzata tra il 2015 e il 2016 secondo le stesse metodologie della Porta Nord. Oltre alla realizzazione delle repliche, l'acquisizione laser scanner ha consentito la creazione di un archivio digitale 3D per completare il quale, nel 2012, è stata realizzata anche l'acquisizione della Porta del Paradiso direttamente all'interno della sua teca protettiva in condizioni di controllo di temperatura e umidità ottimali.

Volendo riassumere brevemente i vari step per le lavorazioni per la Porta Nord: come punto di partenza dell'operazione vi è il rilevamento senza contatto grazie alla scansione laser 3D; sulla base dei dati acquisiti, è stata poi sviluppata la replica digitale, usata come base per la replica fisica prodotta mediante tecnologia additiva (stampa 3D), che sarebbe andata a sostituire la Porta originale del Battistero. Nel frattempo, l'Opificio delle Pietre Dure di Firenze si sarebbe occupato del restauro, affinché l'originale potesse essere esposto nel Museo dell'Opera del Duomo.

IL RILIEVO

Diversi gli elementi che hanno reso il progetto complesso nella sua realizzazione, a partire dalla fase di acquisizione dei dati.

Le procedure odierne non consentono infatti la realizzazione di calchi analogici, i quali potrebbero indurre un ulteriore deterioramento delle opere. Per effettuare le repliche è stato quindi necessario ricorrere a tecnologie di rilevamento senza contatto, come la scansione laser 3D.

Per ridurre i tempi di realizzazione, oltre che per un fattore di praticità nel corso delle lavorazioni, gran parte dell'ac-

quisizione è stata effettuata in loco con entrambe le ante della Porta ancora montate all'ingresso del Battistero, con l'abituale flusso di turisti e all'interno del quale le normali funzioni religiose continuavano a svolgersi. È chiaro che tale condizione riduceva considerevolmente la finestra di accesso al manufatto, allungando i tempi di acquisizione e rendendo l'operazione in generale molto più complessa.

Fondamentale per la riuscita del progetto è stata la pianificazione delle operazioni di rilievo con la creazione di una mappa di riferimento delle varie componenti della Porta. Non potendo acquisire il manufatto in un'unica soluzione, si è proceduto inizialmente con la scansione delle ventotto formelle, quattordici per ogni anta. Di queste, quelle in basso erano facilmente raggiungibili utilizzando il tripode in dotazione allo scanner e nell'allestimento dell'attrezzatura non sono state riscontrate particolari criticità. Per raggiungere le file superiori invece è stato necessario ricorrere ad una piattaforma idraulica mobile messa a disposizione del personale dell'Opera del Duomo. In questo modo è stato possibile adattare il piano di lavoro a seconda dell'avanzamento dei lavori, mantenendo una buona stabilità durante l'acquisizione. Particolarmente impegnativa è risultata la scansione delle formelle adiacenti gli stipiti della Porta, che riducevano l'angolo di presa nelle inquadrature di scorcio. Il problema veniva in parte risolto orientando le ante (ove possibile), mentre le porzioni rimaste in ombra sarebbero state integrate successivamente, dopo il trasferimento della Porta nei

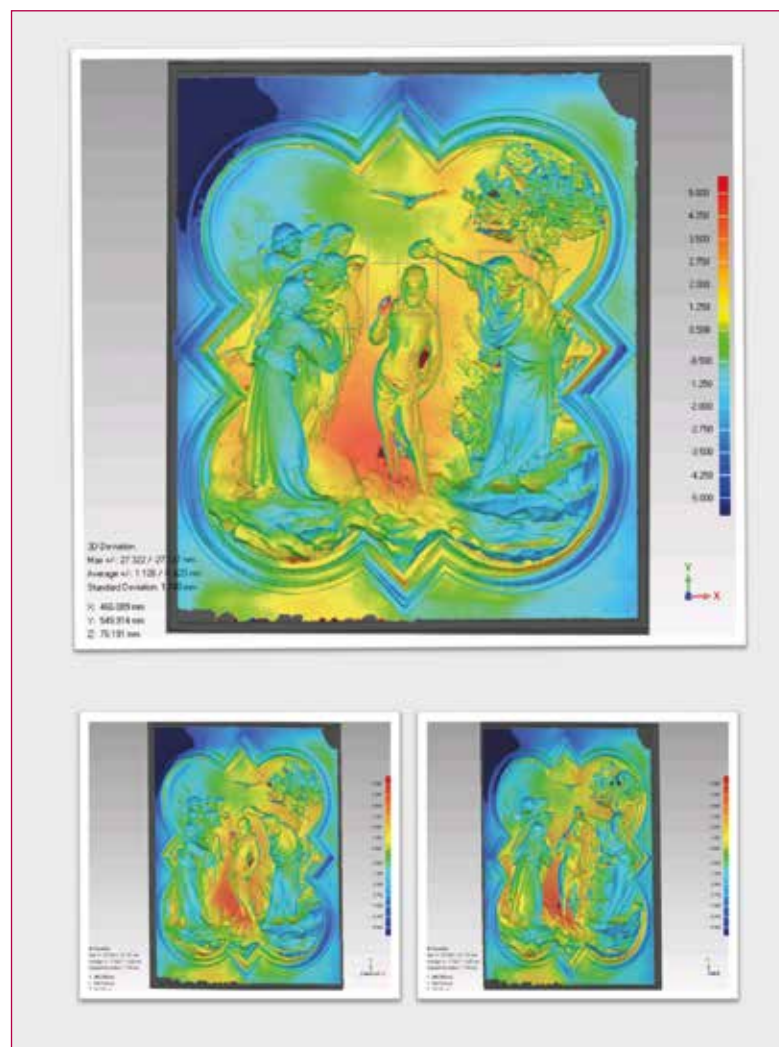


Fig. 2 - Estratto dal report per la verifica di scostamento tra la scansione del manufatto originale e la corrispondente replica in fusione.

laboratori dell'Opificio delle Pietre Dure, che si è occupato del restauro.

In questa fase le ante erano disposte orizzontalmente su appositi supporti per favorire il lavoro dei restauratori. In alternanza con questi ultimi si riusciva ad effettuare più agevolmente le integrazioni di cui sopra, oltre ad acquisire tutto l'impianto decorativo delle cornici. Tali decorazioni sono costituite da ornamenti floreali abbinati a riproduzioni di insetti e piccoli animali a tutto tondo, tipici del linguaggio figurativo del periodo. Anche se elementi decorativi di secondo piano, tali soggetti presentavano anch'essi un elevato livello di pregio formale, tale da richiedere lo stesso grado di dettaglio delle formelle. Oltre ai decori "floro-faunistici" le cornici presentavano all'altezza delle intersezioni tra tratti verticali e orizzontali dei ritratti umani a mezzo busto, che si pensa ritraggano i volti delle maestranze che contribuirono all'opera. Tra loro anche la raffigurazione dello stesso Ghiberti con la testa avvolta nel suo turbante. Nel corso degli anni uno dei suddetti ritratti è stata vittima di vandalismo da parte di un turista che si dice stesse tentando di arrampicarsi sulla porta. Strappata via dall'incauto gesto era rimasta custodita nella cassaforte dell'Opificio delle pietre Dure in attesa di tornare al suo posto grazie al restauro. Anche questo particolare è stato oggetto di acquisizione e stampa 3D, in base alla quale gli artigiani in fonderia sono riusciti a riprodurla e a reinserirla nel complesso della replica della porta. Sempre durante il periodo di stazionamento presso il laboratorio di restauro si è proceduto all'acquisizione dei pannelli posti sul retro della porta, quattordici per ciascuna anta, in corrispondenza delle formelle sul fronte, sui quali sono raffigurati delle teste di leone in altorilievo.

È chiaro come l'individuazione delle tecnologie più idonee in riferimento alle condizioni operative, sia per quanto riguarda la fase di acquisizione che per quella di realizzazione delle repliche in prototipazione, sia stata decisiva per la buona riuscita del progetto.

Per la fase di acquisizione, la scelta è ricaduta sulla combinazione di due tecnologie scanner complementari: uno scanner a variazione di fase (Faro Focus 3D, utilizzato in ambito architettonico) e uno a triangolazione laser ad alta risoluzione (Minolta Range 7).

Lo scanner a variazione di fase utilizzato consente riprese a corto-medio raggio (da uno a venticinque metri) con un'accuratezza a venti metri di circa tre millimetri. Basandosi su una proiezione sferica, questo valore si riduce sensibilmente a distanze ravvicinate. Il dato raccolto risultava quindi idoneo a una rappresentazione a scala architettonica del manufatto riuscendo al contempo a rilevare parte della facciata e dell'interno del battistero. La nuvola di punti ottenuta è stata utilizzata come base di riferimento per la definizione degli ingombri del telaio e il posizionamento generale dei singoli componenti, tutte informazioni fondamentali per la ricomposizione della replica sia per quanto riguarda la struttura che l'impianto decorativo.

Lo scanner a triangolazione laser ad alta risoluzione ha fornito l'adeguato livello di definizione in funzione delle particolari condizioni ambientali. Nella fase di valutazione preliminare sono state prese in considerazione altre tecnologie di acquisizione come gli scanner a luce strutturata, che a parità di accuratezza teorica risultavano troppo sensibili alle variazioni di illuminazione.

Dovendo operare in differenti condizioni ambientali sia all'esterno, con esposizione alla luce del sole, sia all'interno presso il laboratorio di restauro dell'Opificio delle Pietre Dure di Firenze, in condizioni ottimali di illuminazione controllata, la triangolazione laser è risultata la tecnologia più idonea allo scopo. Per validare la scelta di questo tipo di tecnologia e per dimostrare la sua efficacia alla committenza è stato condot-

to un test preliminare su una delle formelle, quella relativa all'"Annunciazione". Non essendoci riferimenti precedenti, era fondamentale testare empiricamente tutte le fasi del procedimento. È stata effettuata quindi un'acquisizione pilota della suddetta formella, la stessa veniva sottoposta all'elaborazione software attraverso applicazioni specialistiche (Minolta Range Viewer, Geomagic Studio) per l'editing delle nuvole di punti e mesh 3D e strumenti CAD 3D tradizionali (McNeel Rhinoceros, Dassault SolidWorks) fino alla definizione del modello in scala reale compatibile con la stampa 3D. Sulla base della replica in fonderia è stato prodotto il calco in silicone per la fusione a cera persa. Ottenuta la fusione, questa è stata sottoposta a un nuova scansione in modo da sovrapporre il risultato con il dato di partenza e valutarne grado di corrispondenza e tempi di realizzazione. Sulla base del report ottenuto la committenza decideva di procedere con il progetto.

Un aspetto non secondario è stata la mole del dato trattato. Basti pensare che, considerando il livello di dettaglio sub millimetrico richiesto per una riproduzione efficace, il dato acquisito ha raggiunto dimensioni medie di 2 GB, solo in riferimento al dato grezzo per ogni singola formella.

ELABORAZIONE DEI DATI

Ottenuto il dato grezzo, è stato possibile procedere con tutti gli step di elaborazione, la documentazione e la catalogazione fotografica, i report di verifica dimensionale e gli elaborati costruttivi per la realizzazione della replica dal punto di vista strutturale (dimensionamento del telaio e controtelaio), logistico (movimentazione dell'originale, trasporto e installazione della nuova struttura), decorativo (riproduzione delle formelle e dell'apparato decorativo mediante prototipazione additiva 3D).

L'elaborazione dei modelli in ambiente CAD 3D ha permesso la creazione della replica digitale completa, compatibile con le tecnologie di produzione digitale e non, necessarie alla realizzazione della replica reale in fusione.

Tutti i dati acquisiti sono stati quindi organizzati in un archivio digitale, fondamentale al fine di programmare tutte le fasi produttive e per procedere alla classificazione delle informazioni raccolte.

Un'ulteriore possibilità di sviluppo riguarda l'uso dell'archivio digitale già disponibile, al fine di renderlo accessibile tramite le tecnologie VR (realtà virtuale) e AR (realtà aumentata), come in effetti è stato già in parte fatto dal Museo dell'Opera del Duomo. I dati raccolti nell'archivio digitale sono infatti pienamente compatibili con le tecnologie VR e AR, che offrono una grande opportunità per la produzione di contenuti multimediali e interattivi da proporre a un pubblico sempre più ampio.

LA REPLICA

Come per la scelta della tecnologia scanner, anche in questa fase prima di procedere sono state vagliate varie opzioni in base alle tecnologie disponibili.

La stampa a filamento (FDM o FFF) è stata esclusa a priori a causa della scarsa affidabilità e il basso livello di definizione offerto. Pur rappresentando l'alternativa economicamente più conveniente, all'epoca non erano disponibili stampanti di grande formato e i tempi di produzione erano troppo lunghi. La stampa in resina (SLA o Polyjet) offriva un ottimo livello di dettaglio e la migliore qualità superficiale, ma questo tipo di stampanti sono caratterizzate da volumi di lavoro piuttosto contenuti e costi di produzione piuttosto elevati. Dopo aver effettuato alcuni test anche questa opzione è stata scartata, in favore della sinterizzazione laser (SLS, Selective Laser Sintering). Tale tecnologia sfrutta il calore prodotto da un fascio laser concentrato per fondere assieme strati di materiale

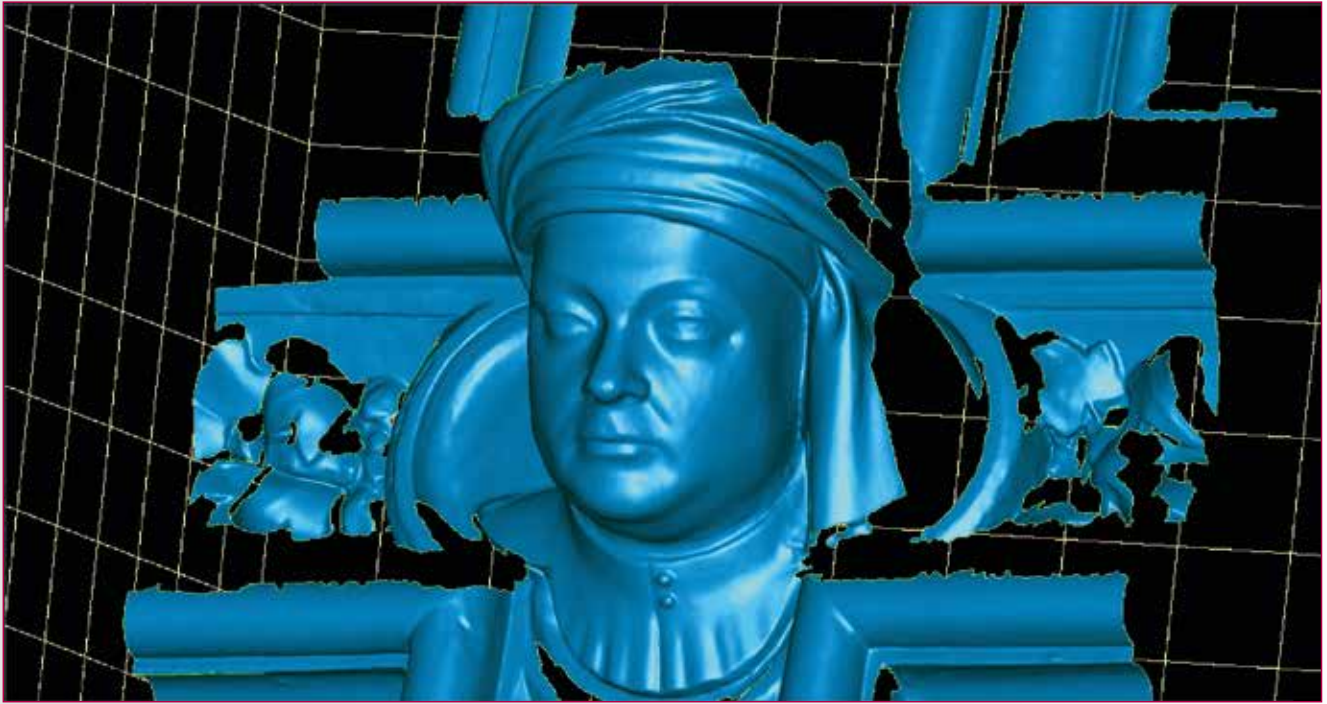


Fig. 3 - Ricostruzione 3D della testa presente sulla Porta Nord che ritrae lo stesso Lorenzo Ghiberti con il capo avvolto in un turbante (Fonte: R. Krautheimer, Lorenzo Ghiberti, 1982 3ª ed., fig. 136a).

plastico sotto forma di micro-granuli (nylon o Poliammide). Il processo produttivo è di tipo industriale e consente di realizzare componenti anche di grandi dimensioni e non prevede l'utilizzo di supporti caratteristico delle altre tecnologie di stampa 3D. Le stampe prodotte assicurano un'ottima resistenza meccanica e un buon grado di finitura superficiale, non richiedono particolari trattamenti post-produzione e il materiale non combusto può essere in parte riutilizzato nei cicli di stampa successivi.

Considerata la scala di intervento, tale tecnologia si è rivelata l'unica che, in linea con le tempistiche e il budget a disposizione per realizzazione e post-produzione, avrebbe potuto fornire un grado di dettaglio adeguato.

Pur disponendo di un volume di stampa considerevole, non è stato possibile produrre le repliche in un'unica soluzione, ma è stato necessario scomporre in più parti le formelle. Le operazioni di segmentazione dei modelli per la stampa non è stato affatto banale, in quanto le linee di taglio non dovevano intercettare alcun elemento scultoreo di rilievo. Considerando l'elevata densità di personaggi ed elementi architettonici che caratterizzano l'opera, trovare il giusto compromesso tra numero di sezioni e rispetto della morfologia delle raffigurazioni non è stato facile. Spesso, anche dietro richiesta degli artigiani in fonderia, si è proceduto con il distacco dei personaggi dallo sfondo. In questo modo la finitura dei particolari risultava più agevole, anche nelle parti tergaltrimenti difficilmente raggiungibili. Un vantaggio rispetto alle tecniche di riproduzione analogiche tradizionali (calco in gomma) è la possibilità di compensare il ritiro del materiale di fusione durante il processo di raffreddamento. Sulla base delle indicazioni della fonderia veniva introdotto un fattore di scala maggiorativo: la replica prodotta infatti non aveva le stesse dimensioni dell'originale, ma leggermente più grandi. Una volta chiuso il ciclo di fusione la replica in bronzo per effetto del ritiro tornava alle stesse dimensioni dell'originale.

CONCLUSIONI

Nel complesso, il progetto si è rivelato un'esperienza di rife-

rimento per l'impiego delle tecnologie di scansione laser 3D applicate alla tutela del patrimonio artistico-culturale.

Possiamo dire che nell'ambito della tutela dei beni culturali l'utilizzo delle tecnologie di acquisizione 3D è ormai consolidato e l'esperienza del restauro e della sostituzione della Porta Nord del Battistero di Firenze rappresenta un caso studio esemplare. Questo non solo per il valore storico-artistico dell'opera in sé, ma anche per la completezza nello sviluppo della filiera che, partendo dall'acquisizione tridimensionale del bene, ha portato alla realizzazione della replica completa dello stesso, passando attraverso la prototipazione virtuale e coinvolgendo attivamente entità professionali e artigianali presenti del territorio.

BIBLIOGRAFIA

- "Battistero di San Giovanni", *Opera di Santa Maria del Fiore*, Consultato 2020, www.duomo.firenze.it
- "La Porta Nord del Battistero", *Opera Magazine (Opera di Santa Maria del Fiore)*, 2015, www.duomo.firenze.it
- "La Porta del Paradiso... O quasil!", *Opera Magazine (Opera di Santa Maria del Fiore)*, 2013, www.duomo.firenze.it
- "Le tre Porte del Battistero di Firenze", *Thema Progetto*, 2019, www.themaprogetto.it

ABSTRACT

The project for the restoration and musealization of the North Door of the Battistero di Firenze or Baptistery of Florence was started in 2012 and completed in 2015. Currently, the original one is kept inside the Museo dell'Opera del Duomo or Opera Duomo Museum. The Door is five meters high and almost three meters wide, composed of twenty-eight rectangular panels. Different entities and professional fields have collaborated on the project. In fact, 3D related technologies have been used for the activities of survey, 3D reconstruction and additive production, while the fusion of the replicas of the panels is an artisan work.

PAROLE CHIAVE

RILIEVO; LASER SCANNER 3D; PRODUZIONE ADDITIVA; RICOSTRUZIONE 3D

AUTORE

P. TIZIANA CAUDULLO
T.CAUDULLO@SYDE.TECH
WWW.SYDE.TECHNOLOGY