

DANIELE BARTOLUCCI

# PRINCIPI DI LASER SCANNING 3D

HARDWARE - METODOLOGIE APPLICATIVE - ESEMPI



### SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- filodiretto con gli autori
- le risposte degli autori a quesiti precedenti
- files di aggiornamento al testo
- possibilità di inserire il proprio commento al libro.

L'indirizzo per accedere ai servizi è: [www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF8623](http://www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF8623)

## INDICE

---

<i>Premessa</i> .....	pag. 7
<i>Prefazione</i> .....	» 9
1. IL LASER	
1.1. Definizione di laser .....	» 11
1.2. Caratteristiche principali del laser .....	» 11
1.3. Descrizione dei principali tipi di laser .....	» 13
1.4. Rischi e precauzioni nell'utilizzo del laser .....	» 13
1.5. Classificazione .....	» 13
1.6. Cenni sulla riflessione del laser nei diversi materiali .....	» 14
2. IL LASER SCANNER	
2.1. La stazione totale e il laser scanner: differenze e uguaglianze .....	» 17
3. I PRINCIPI DI MISURAZIONE	
3.1. Generalità .....	» 21
3.2. Triangolatori.....	» 21
3.3. Scanner a tempo di volo.....	» 25
3.4. Distanziometri a misura di fase .....	» 26
4. PORTATE E FINESTRA DI LAVORO DEI LASER SCANNER	
4.1. Scansioni e zone d'ombra .....	» 29
5. ALTRE INFORMAZIONI MISURABILI CON I LASER SCANNER	
5.1. Luminanza .....	» 31
5.2. Valore <i>true color</i> .....	» 34
5.3. Valore della direzione normale .....	» 37
6. IL RILIEVO SUL CAMPO	
6.1. Introduzione .....	» 39
6.2. Setting dello strumento .....	» 39
6.3. Accorgimenti .....	» 42
7. L'UNIONE DELLE SCANSIONI	
7.1. Determinazione di mire e sfere .....	» 45
8. L'ELABORAZIONE DEI DATI	
8.1. Pulizia e semplificazione della nube .....	» 55
8.2. Sezioni .....	» 60
8.3. Calcolo dei volumi.....	» 62
8.4. Mesh.....	» 65
8.5. Editing della mesh .....	» 71

8.6. Colorazione della mesh .....	»	76
8.6.1. Ortofoto .....	»	80
9. MODELLAZIONE SOLIDA		
9.1. Introduzione .....	»	85
9.2. Vincoli .....	»	88
9.3. Editing degli elementi .....	»	89
10. ESEMPI PRATICI		
10.1. Rilievo tramite tecnologia laser scanner 3D dello scafo di un'imbarcazione a vela e determinazione delle sezioni trasversali tipiche delle costruzioni navali .....	»	95
10.2. Rilievo archeologico mediante dispositivo scanner laser 3D. Verso una registrazione tridimensionale delle evidenze stratigrafiche: l'edificio 2 - magazzino - nel sito archeologico di Classe .....	»	100
10.3. Radiotelescopi di Noto e Medicina: deformazioni gravitazionali valutate tramite un'indagine laser terrestre .....	»	105
10.3.1. Peculiarità dei radiotelescopi di Medicina e di Noto .....	»	105
10.3.2. Misure effettuate presso gli osservatori radioastronomici di Medicina e Noto .....	»	107
10.3.3. Elaborazione dei dati .....	»	108
10.3.4. Calcolo delle deformazioni gravitazionali delle antenne VLBI .....	»	110
10.3.5. Conclusioni .....	»	111
10.4. Rilievo delle superfici curve della cappella Palatina di Palermo .....	»	112
10.4.1. Rilievo topografico tradizionale e con laser a scansione .....	»	113
10.4.2. Rilievo delle superfici curve della cappella Palatina di Palermo ....	»	113
10.4.3. Rilievo fotogrammetrico .....	»	115
10.4.4. Conclusioni .....	»	116
10.5. Rilievo del villino Ruggeri di Pesaro .....	»	117
10.6. Modelli digitali 3D in archeologia: conservazione, restauro e fruizione ....	»	124
10.6.1. Sistemi a tecnica additiva di materiale .....	»	124
10.6.2. Sistemi a tecnica sottrattiva di materiale .....	»	124
10.6.3. Copia di statue e bassorilievi direttamente in pietra naturale .....	»	125
10.6.4. Modelli digitali 3D in archeologia: conservazione, restauro e fruizione .....	»	126
11. GLI IBRIDI DEL RILIEVO		
11.1. Stazioni totali motorizzate ad elevate prestazioni .....	»	129
11.2. Total Station e laser scanner .....	»	130
11.3. Scansione intelligente (feature scan) .....	»	131
11.4. Primo test eseguito in architettura .....	»	131
<i>Conclusioni</i> .....	»	134
<i>Bibliografia e riferimenti</i> .....	»	135
<i>Sitografia</i> .....	»	135
<i>Immagini da software</i> .....	»	135

## **PREMESSA**

Il presente volume nasce da un'esperienza decennale, maturata nel settore dei laser scanner. Nel redigere il testo si è avuto cura di dare speciale rilievo al lavoro svolto dall'autore presso la Geotop s.r.l. della città di Ancona, che ha avuto come obiettivo principale quello di far conoscere la tecnologia laser scanner, e le relative potenzialità, a studi di ingegneria, di architettura, a università tecniche ed enti.

Un esame approfondito delle tecniche in uso ha permesso di migliorare e completare le strumentazioni e i relativi software per renderli più vicini all'utilizzo comune. Nel corso della stesura si è voluto adottare una rigorosa semplicità di esposizione in quanto il libro vuole essere uno strumento di facile consultazione ed elevata comprensibilità data la vastità degli argomenti trattati.

Il lettore troverà una trattazione completa, anche se a tratti necessariamente sintetica, di tutto ciò che concerne il rilievo tridimensionale. Per chi volesse approfondire gli argomenti trattati può consultare il sito Internet [www.pls3d.com](http://www.pls3d.com).

Il testo si può virtualmente suddividere in tre parti: nella prima vengono spiegate le strumentazioni hardware, quindi i laser scanner propriamente detti; seguono i capitoli che analizzano le numerose operazioni che oggi tutti i software richiedono per l'elaborazione del dato a "nube di punti"; infine è presente una parte riguardante alcune esperienze dell'attività professionale dell'autore svoltesi all'interno di atenei e in collaborazione con altri studiosi del campo.

## PREFAZIONE

La prima volta che ho visto un rilievo effettuato con il laser a scansione è nel 1999 al convegno internazionale del Cipa (World Heritage Documentation) di Olinda, in Brasile. Il compianto Robin Letellier, architetto conservatore di Montreal, mostrò una serie di esempi stupefacenti e impressionanti per verosimiglianza, qualità, ricchezza di dettagli. A dir la verità, già in precedenza io stesso avevo effettuato la scansione di due cupole, quella del Battistero di san Giovanni a Firenze e quella della sala ottagonale della domus aurea a Firenze, ma la scarsità di punti rendevano quei rilievi molto diversi, meno dettagliati, meno significativi di quelli di Letellier e mi fece apparire quello che vedevo a Olinda, una assoluta novità tecnologica. Finalmente era possibile ricostruire in scala 1/1 una statua, un qualunque oggetto, una architettura, con una incredibile fedeltà di dettaglio. Il vecchio problema della fotogrammetria architettonica, quello di rilevare e poi rappresentare il rilievo di un oggetto complesso, come una statua, era finalmente risolto. Ormai sono passati quasi dieci anni dal convegno di Olinda, e il laser a scansione terrestre per il rilievo architettonico è diventato una strada obbligata, uno strumento indispensabile agli operatori del settore al punto che la fotogrammetria architettonica, quella che una volta veniva chiamata fotogrammetria dei vicini, ha perso molta della sua importanza, del suo fascino. Non c'è dubbio che la più importante novità tecnologica nel campo del rilievo sia stata il laser a scansione, soprattutto per il rilievo architettonico. Il limite discriminatorio della attrezzatura consiste tuttavia ancora nel suo costo cospicuo, tale da renderlo non disponibile alle magre risorse della maggioranza dei laboratori universitari italiani. Il che non significa che questi non effettuino rilievi mediante scansione laser. Per esempio, con il laboratorio, abbiamo portato a termine molte scansioni. Debbo veramente un grande ringraziamento quindi all'amico Daniele per essersi reso disponibile a collaborare, ed effettuare le scansioni come quelle dell'anfiteatro romano e della facciata del duomo di Ancona, della sagrestia vecchia di san Lorenzo a Firenze, del villino Ruggeri di

Pesaro. Ringraziamento non solamente per la sua disponibilità ma anche elogio alla sua competenza, perizia, abilità. Questo libro nasce come una sintesi, come una antologia, una collezione di esempi, utili per consultazione, da parte di architetti, ingegneri, tecnici del restauro, appassionati di architettura. Voglio sperare che diventino una specie di prontuale operativo ovvero di manuale per i riferimenti che esso può fornire, preziosi suggerimenti di prassi operativa da seguire, spunti illuminanti di occasioni, di tipologie di intervento.

Gabriele Fangi

# 1. IL LASER

## 1.1. DEFINIZIONE DI LASER

Laser è l'acronimo inglese di *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*, ovvero amplificazione di luce tramite emissione stimolata di radiazioni.

Tutto nasce da un'intuizione di Albert Einstein del 1917 su un effetto chiamato *emissione stimolata di radiazione*, per cui è possibile indurre un atomo a emettere radiazione se illuminato da una radiazione dello stesso tipo. Differentemente dalla luce prodotta da una normale lampadina, il laser possiede alcune peculiarità che lo rendono unico: un dispositivo laser produce, infatti, un fascio luminoso direzionale costituito da fotoni di energia ben definita e intensità del fascio molto elevata dove quest'ultima dipende dal numero di fotoni in esso contenuto<sup>1</sup>.

## 1.2. CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL LASER

Il laser presenta delle particolari caratteristiche. Di seguito si citano quelle più importanti:

- unidirezionalità: la luce laser si propaga in una direzione ben definita, a differenza della luce di una normale lampadina ad incandescenza che emette luce in tutte le direzioni; un fascio laser a grande distanza diverge in maniera minima;
- monocromaticità: la radiazione laser presenta sempre una stessa frequenza, mentre una lampadina ad incandescenza emette radiazione composta da fotoni di energie differenti;
- coerenza: il fascio di luce laser deve essere costituito da onde della stessa frequenza e della stessa fase che si sommano l'una all'altra con grande

<sup>1</sup> Bornaz L., *Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione*, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente del Territorio e delle Geotecnologie, Politecnico di Torino.

intensità e potenza. Si considerano due sorgenti puntiformi identiche e si suppone che emettano onde continue; in tutti i punti dello spazio le intensità delle due onde saranno nel tempo costantemente le stesse. Le due sorgenti si diranno *coerenti* fra loro.

La lunghezza d'onda del laser può variare dai 200 nm ai 700 nm passando così dall'ultravioletto al visibile e all'infrarosso. Si ricorda che per lunghezza d'onda s'intende la distanza fra i due punti di massima altezza dell'onda.

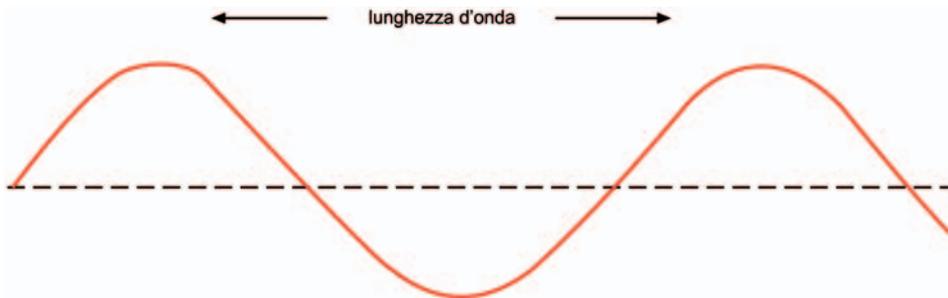


Figura 1.1  
Rappresentazione della lunghezza d'onda

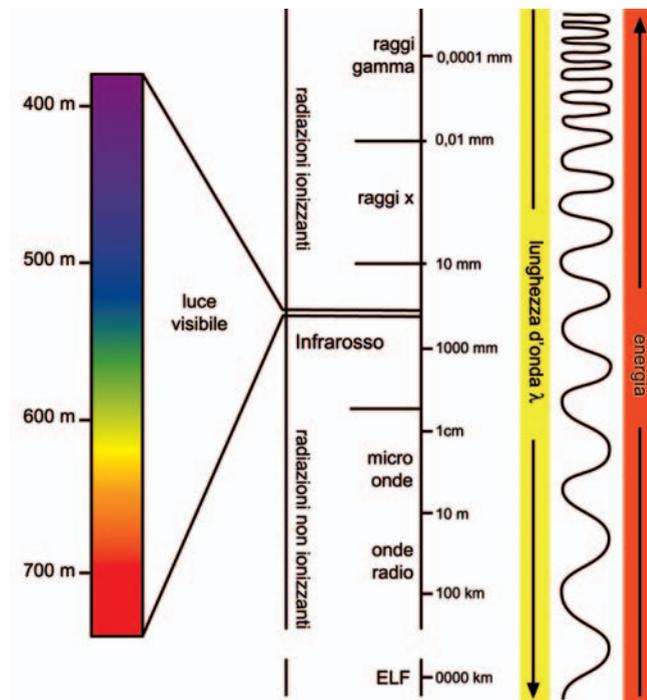


Figura 1.2  
Schematizzazione dello spettro  
elettromagnetico, luce visibile  
energia e lunghezza d'onda

### **1.3. DESCRIZIONE DEI PRINCIPALI TIPI DI LASER**

Un laser è costituito tipicamente da un cilindro allungato di materiale attivo, in grado di amplificare la radiazione che lo attraversa, inserito fra una coppia di specchi contrapposti, di cui uno è parzialmente trasparente per consentire l'estrazione del fascio, che rinviano continuamente la radiazione attraverso il materiale stesso.

I diversi tipi di laser si distinguono per consuetudine in base allo stato di aggregazione del materiale attivo. Si hanno così:

- laser a stato solido, a cristalli e vetri o a semiconduttori;
- laser a liquidi;
- laser a gas (ulteriormente suddivisi in laser ad atomi neutri, laser ad ioni, laser molecolari, laser ad eccimeri e laser ad elettroni liberi)<sup>2</sup>.

### **1.4. RISCHI E PRECAUZIONI NELL'UTILIZZO DEL LASER**

I rischi derivanti dall'utilizzo di dispositivi laser interessano direttamente la persona e possono creare disturbi alla pelle e agli occhi. È sempre importante conoscere il livello massimo di radiazione al quale possono essere esposti questi organi, per evitare che subiscano danni a breve o a lungo termine. La tollerabilità da parte dell'uomo alla radiazione laser è direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda, alla durata dell'esposizione, alla modulazione e all'organo colpito, ed è definita da specifiche tabelle. Un tecnico laser dovrebbe avere sempre competenze specifiche relative ai problemi di sicurezza ed adeguarsi alle norme di utilizzazione del laser. È invece responsabilità del costruttore o del suo agente fornire la corretta classificazione di un apparecchio laser. Quando la modifica da parte dell'utilizzatore di un apparecchio già classificato influenza un aspetto qualunque delle prestazioni dell'apparecchio o delle sue funzioni, chi effettua tale modifica ha la responsabilità di assicurare la riclassificazione e quindi la nuova targatura dell'apparecchio laser.

### **1.5. CLASSIFICAZIONE**

I laser sono classificati in classi crescenti di rischio:

- classe 1: laser che sono sicuri nelle condizioni di funzionamento ragionevolmente prevedibili;

<sup>2</sup> Dispense del corso di sicurezza laser dell'ing. Piergiorgio Aprili. (<http://www.ac.infn.it/sicurezza/rel/LASER.pdf>)

- classe 2: laser che emettono radiazione visibile nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 400 e 700 nm. La protezione dell'occhio è normalmente assicurata dalle reazioni di difesa, compreso il riflesso palpebrale;
- classe 3A: laser che sono sicuri per la visione ad occhio nudo. Per i laser che emettono nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 400 e 700 nm, la protezione è assicurata dalle reazioni di difesa, compreso il riflesso palpebrale. Per le altre lunghezze d'onda il rischio per l'occhio nudo non è superiore a quello di classe 1. La visione diretta del fascio dei laser di classe 3A con strumenti ottici (binocoli, telescopi, microscopi) può essere pericolosa;
- classe 3B: la visione diretta del fascio di questi laser è sempre pericolosa. La visione di riflessioni diffuse è normalmente pericolosa;
- classe 4: laser che sono in grado di produrre riflessioni diffuse pericolose. Possono causare lesioni alla pelle e potrebbero anche costituire un pericolo di incendio. Il loro uso richiede un'estrema cautela<sup>3</sup>.

## 1.6. CENNI SULLA RIFLESSIONE DEL LASER NEI DIVERSI MATERIALI

La riflessione del raggio laser dipende dalla rugosità della superficie e dalla lunghezza d'onda del laser.

Nel caso di superficie rugosa la riflessione segue il principio della legge di Lambert, quindi la direzione di riflessione è indipendente da quella del raggio incidente; se invece la superficie è perfettamente liscia, la riflessione del raggio è speculare.

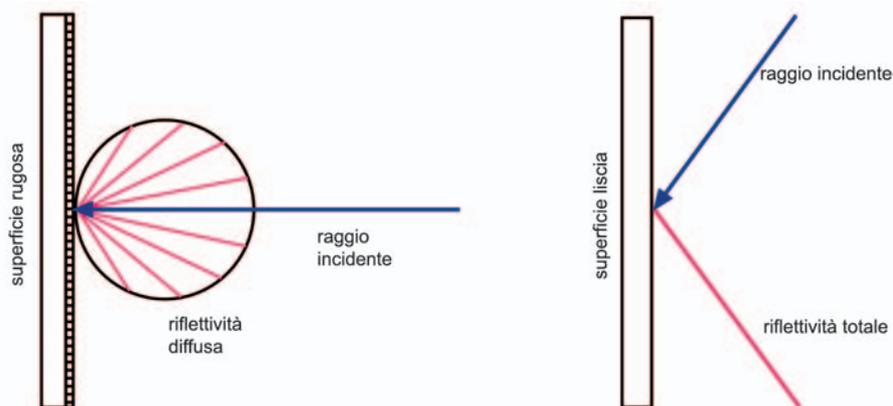


Figura 1.3  
Confronto tra la riflessione del raggio su superficie rugosa e liscia

<sup>3</sup> Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Sezione di Padova. (<http://www.pd.infn.it/safety/laser/laser.html>)

Nella realtà difficilmente ci si trova a misurare in superfici simili a quelle descritte. Il raggio laser quindi si comporta in maniera ibrida.

Infine una reazione diversa avviene per le superfici catarifrangenti o retro-riflettenti dove il raggio laser viene respinto nella stessa identica direzione del raggio incidente. Questa eccezione è sfruttata, come si vedrà in seguito, per individuare dei target (mire) simili a quelli usati in topografia, al fine di unire più scansioni fra loro o georeferire le nubi di punti a un sistema topografico noto.

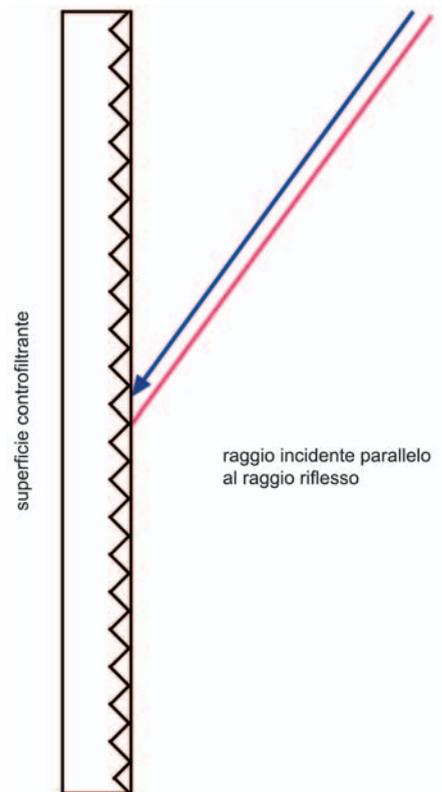


Figura 1.4  
Rappresentazione di un raggio laser  
su superficie catarifrangente

## 5. ALTRE INFORMAZIONI MISURABILI CON I LASER SCANNER

### 5.1. LUMINANZA

Come accennato in precedenza i laser scanner, oltre a misurare migliaia di punti al secondo attribuendogli valori di coordinate  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , sono in grado di misurare informazioni.

Alle misure più utili sicuramente appartiene il valore di luminanza che si riferisce alla misura della quantità di segnale laser di ritorno allo strumento.

Il valore ottenuto dipenderà dalla natura della superficie stessa, dal suo indice di riflessione e dall'angolo di visione. La sua unità di misura è  $\text{cd/m}^2$  (candele al metro quadro).

Il funzionamento è molto semplice. Si ipotizza che il raggio laser parta dallo strumento con valore di intensità massima pari a 100, colpisca l'oggetto, ed in base alla natura dello stesso ritorni allo strumento con valore differente. Una parte del raggio laser viene assorbita, una parte si disperde e così via; quindi il diodo ricevitore ne registra l'intensità di ritorno e gli assegna un tono di grigio da 1 a 256. Da ciò una superficie chiara risponderà con un segnale sicuramente più forte di una superficie scura, un materiale poroso assorbirà più luce di uno compatto o la stessa superficie risponderà in maniera differente se impregnata di acqua o di umidità.

Analizzando velocemente le immagini di una stessa scansione è inevitabile notare come la vista a toni di grigio sia di più facile interpretazione e come aumenti la percezione della tridimensionalità.

Nella figura 5.1 è possibile notare come il materiale dello scafo sia sempre lo stesso, ma le colorazioni differenti hanno fatto sì che il ritorno del segnale laser fosse di differente intensità.

Nella figura 5.2 si vede come il dato della luminanza permetta di individuare le aree con colorazione differente.

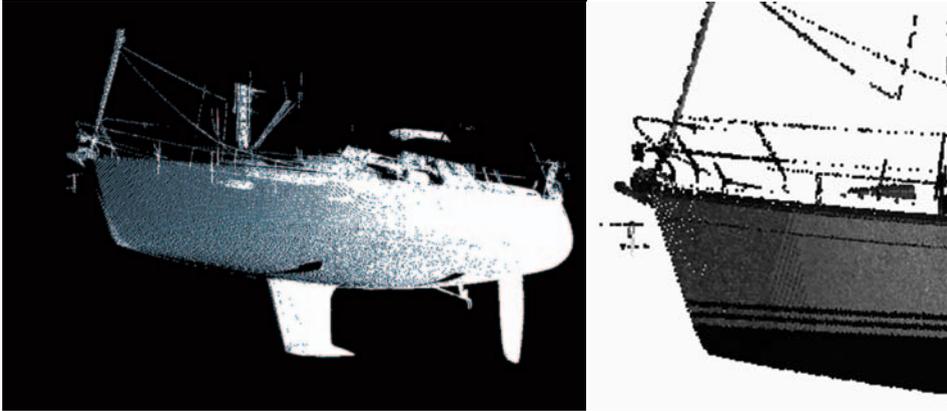


Figura 5.1

Nube di punti di uno scafo visualizzazione con solo valore di coordinate e visualizzazione con valore di luminanza

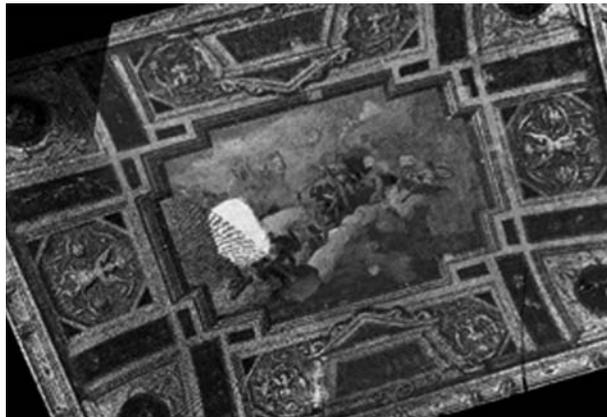


Figura 5.2  
Affresco su cupola

Il valore della luminanza risulta essere differente se si misurano materiali differenti o con porosità diverse. È anche differente su pareti con stessa esposizione alla luce solare e ugual materiale che però presentano un differente grado di umidità.

Viste le enormi quantità di variabili risulta tutt'oggi impossibile riuscire ad ottenere una catalogazione dei valori di luminanza in base ai singoli parametri.



Figura 5.3  
Altri esempi di nubi con valore di luminanza

È invece possibile, con appositi filtri software, selezionare tutti i punti con valore di luminanza affine, isolando così un materiale specifico rispetto ad un altro, un particolare colore o una macchia d'umidità in base all'utilizzo che il tecnico ne deve fare.

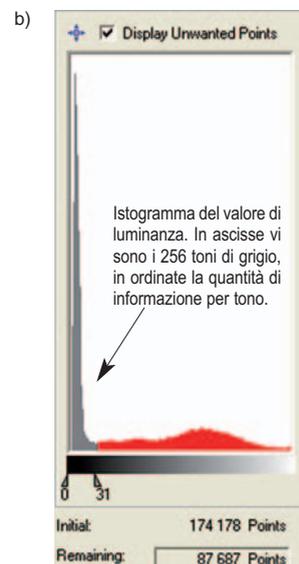
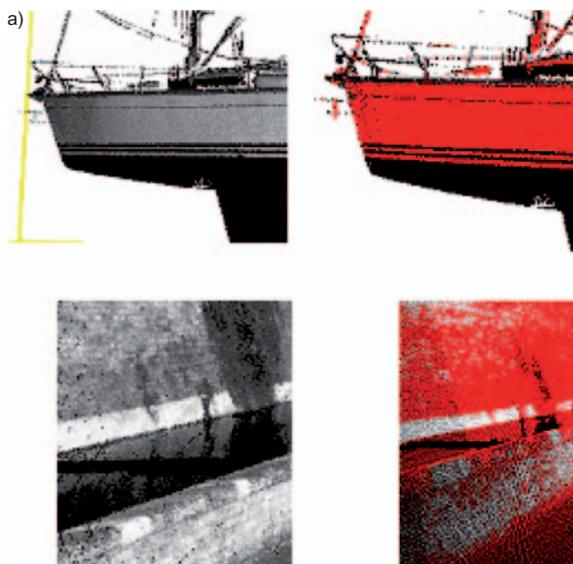


Figura 5.4  
Selezione di punti con valore omogeneo di luminanza