
**PARTE III -
APPROCCIO METODOLOGICO PER LA DOCUMENTAZIONE DEGLI INTONACI**



4. Metodologie di rilevamento

Leggere una facciata ornata a sgraffito o dipinta, significa relazionarla con altre facciate sviluppate con le stesse intenzioni comuni tra significato, progetto e applicazione pratica. Ma questo è perseguibile solo attraverso il raffronto reale, recependo il rilievo come mezzo necessario a garantire la più appropriata restituzione dell'oggetto, attraverso un'adequata scala di rappresentazione in cui confluiscono misura, forma e contenuto. Ovviamente non è garantita la copertura globale di tutte le facciate censite mediante le operazioni di rilievo, soprattutto per ragioni di tempo e difficoltà per alcune situazioni; a volte gli edifici si trovano in vicoli angusti che riducono notevolmente gli spazi minimi per il rilievo e la presa fotografia, per non parlare di alcune proprietà in cui è quasi impossibile accedervi agevolmente.

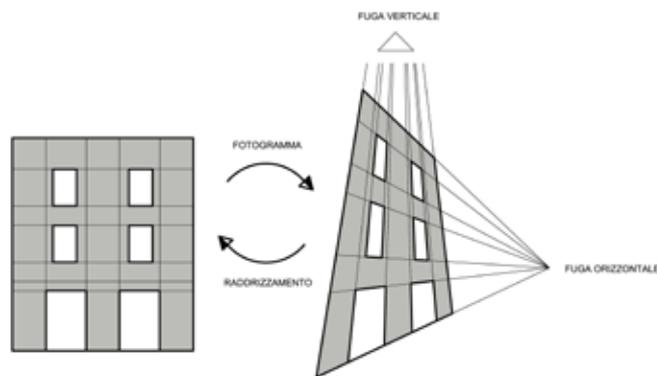
4.1 Il rilievo fotogrammetrico

Tra le varie metodologie di rilievo capaci di restituire una facciata decorata, le più consone risultano quelle che adottano i principi della fotogrammetria. Normalmente per fotogrammetria intendiamo quel processo che trae informazioni metriche dalla fotografia. Ma per ottenere un risultato soddisfacente è necessario integrare la strumentazione di tipo tradizionale (fettuccia, asta metrica, filo a piombo, livello, etc.), con quella strumentale (stazione totale e/o fotocamera digitale), passando attraverso l'utilizzo della computer grafica per l'elaborazione finale. Infatti l'informatica ha cambiato notevolmente gli strumenti tradizionali della rappresentazione e ci si affida sempre di più a software di livello professionale dedicati al raddrizzamento di foto digitali ed anche alla realizzazione di veri e propri fotopiani. Il principio è semplicemente quello di effettuare una trasformazione inversa di tipo omografico (sfruttando le regole della geometria descrittiva), che porti ad ottenere da una immagine fotografica di una facciata in proiezione centrale, una immagine dove il piano di questa facciata appare in proiezione ortogonale.

Per questo tipo di rilevamento, molto rapido nella sua esecuzione e anche piuttosto economico, è necessario disporre di una buona fotocamera digitale ad alta risoluzione, possibil-

mente una reflex con obiettivo 35 mm dotata di ottiche fisse 28 mm e 50 mm (o simili). Le operazioni digitali che si adottano per restituire un fotopiano, a seconda della strumentazione a disposizione, dei risultati che si vogliono ottenere e del livello di precisione necessario, possono essere di due tipi:

- geometrico, qualora non si disponga di strumentazione topografica per il rilievo. Ovviamente questo sistema è più consono se la facciata presenta spazi per la ripresa fotografica talmente ampi da poter operare su un unico fotogramma o massimo due. In questa maniera con il software ARCHIS della SISCAM-GALILEO è possibile ottenere quel fascio di rette che confluiscono nel punto di fuga prospettico, operando solitamente su due allineamenti orizzontali e due verticali appartenenti al piano e su un rapporto fra due misure (appartenenti sempre al medesimo piano), di cui una orizzontale e una verticale, che siano significative, (grandi), rispetto agli elementi raffigurati nel fotogramma (fig.). Per determinare quanto sopra senza prendere misure di punti di controllo, è necessario che sul piano siano presenti elementi ben allineati fra di loro quali ad esempio, cornici marcapiano, stipiti delle finestre, lesene, decorazioni, etc.
- analitico, se siamo in possesso di strumentazione topografica (ad esempio una stazione totale dotata di misuratore laser a riflesso diretto), che rileva almeno quattro punti



Principio di fotogrammetria

di controllo per ciascun fotogramma. Il software ARCHIS, dopo aver acquisito in forma digitale un fotogramma, chiede all'operatore di immettere le coordinate dei punti di controllo e, a questo punto, è ormai in grado di effettuare non solo il raddrizzamento, ma anche di riportare la foto digitale alla scala desiderata, in modo da avere un'immagine nella scala più opportuna.

La differenza tra i due metodi è che nel primo, il grado di precisione ottenibile è relativamente basso rispetto al secondo. Ciò è dovuto sostanzialmente al fatto che l'operatore possa commettere gravi errori, considerando allineati certi elementi che di fatto non lo sono o considerando orizzontali e/o verticali elementi con inclinazione differente. Quando sia necessario ricorrere a più immagini per ricoprire l'intera facciata da rilevare o addirittura intere cortine stradali, sopraggiungono ulteriori software tipo PHOTOSHOP dell'ADOBE che consente di collegare o meglio fotomosaicare i vari fotogrammi (già prima raddrizzati singolarmente se questi non hanno il punto di scatto alla stessa origine), e ottenere così l'immagine intera¹.

Il lavoro di restituzione si chiude, rielaborando i fotopiani (fig. 6) e tutte le misurazioni prese attraverso l'uso di un software che gestisce file vettoriali come AUTOCAD dell'AUTODESK, ottenendo così il rilievo a fil di ferro. In questa fase, meritano attenzione tutti quegli elementi quali tetti, cornicioni, terrazze, colmi, gronde, etc., che, non appartenendo al piano del prospetto, vengono rappresentati tramite post-produzione grafica e nel caso specifico dei tetti (difficilmente fotografabili) tramite ricostruzione da rilievo a vista². Operazioni queste che possono essere sostituite dalla più moderna tecnologia in campo di rilevamento che prevede il rilievo integrale in

tre dimensioni, ottenuto mediante scansione laser a nuvola di punti. Ma nel nostro caso quest'ultimo sistema, a parità di risultato, risulta molto più oneroso rispetto al semplice utilizzo della fotografia. Anche perché la finalità propria del rilievo non è quella di ottenere un risultato metrico di tipo tridimensionale ma bensì bidimensionale, considerato che il tipo di ornamento in facciata è rappresentato da un apparato pittorico.

4.2. Il rilievo del colore

Durante le fasi di rilevamento, una parte di degna nota risulta il rilievo del colore.

«Il progetto del colore nasce da un rilievo complesso, che può riuscire a raccogliere e a selezionare diversità formali, dimensionali, posizionali, in modo tale da visualizzare la condizione esistente. [...] Il rilievo del colore, dunque, deve essere finalizzato alla realizzazione di uno strumento operativo, che possa codificare la condizione cromatica, permettendo di raggiungere un equilibrio tra il bisogno di conservazione e il desiderio di rinnovamento nella rilettura dei segni del passato. [...] Nell'affrontare il problema sul piano della messa in atto di un rilievo che possa raccogliere dati elaborabili e soprattutto confrontabili fra loro si presentano due possibilità principali: utilizzare un *metodo strumentale scientifico non invasivo*, campionando un numero limitato di fronti/facciata con uno *spettrofotometro*, di cui se ne parlerà meglio nel paragrafo successivo»³, oppure un *metodo visivo-comparativo*, basato sulla capacità dell'occhio umano di percepire l'analogia di un tono di colore presente in facciata con uno dei colori



Individuazione del fascio di rette orizzontali e verticali sul fotogramma attraverso l'uso del metodo geometrico del software ARCHIS

di una campionatura di riferimento.

«Il secondo metodo è sicuramente il più attuabile in quanto:

1. *permette di ampliare il contesto di rilevazione*: la gamma-campione delle tinte di riferimento può essere utilizzata in più copie contemporaneamente da più squadre di rilievo, anche per la pratica facilità d'uso;

2. *riduce il costo di rilevazione*: il metodo visivo non richiede personale specializzato e afflitto di strumentazioni; il costo può essere ancora ridotto se vengono utilizzate collezioni di tinte realizzate su modelli cromatici commerciali selezionati per l'architettura;

3. *diviene un valido strumento di verifica e di attuazione del progetto*: il colore rilevato è facilmente confrontabile ed utilizzabile anche per il progettista e per il tecnico deputato al controllo, contribuendo così ad una migliore divulgazione e aggiornabilità del sistema nel suo complesso [...].

I sistemi di campionamento visivi standard attualmente si dividono in due gruppi: il primo comprende il *sistema Munsell* e *ACC*, strutturati su un principio di apparenza del colore; mentre il secondo, che fa capo al *sistema Ostwald*, è fondato su un criterio di mescolanza del colore. [...] Scientificamente il sistema di notazione maggiormente internazionalizzato nel campo architettonico è quello che si riferisce proprio al *Munsell Book of Color*, contenente circa 1500 colori, a cui si può accompagnare il criterio di denominazione ISCC.NBS, capace di definire le designazioni dei numeri dei colori, molto utile per la creazione di atlanti cromatici, riferibili a specifici contesti ambientali [...].

Un più pratico strumento utilizzato sia in fase di rilievo che di progetto del colore, risulta il catalogo commerciale "*Sikkens color collection 3031*"⁴, che si presenta in un formato mazzetta di oltre 1300 campioni cromatici codificati secondo il sistema ACC, specificatamente selezionati per l'architettura. [...] Il modello nasce da una semplificazione del sistema Munsell e, pur offrendo sicuramente un minor livello di scientificità e di *rispondenza filologica* per quanto riguarda i raffronti storici e le attribuzioni cromatiche ai materiali lapidei, possiede utili caratteri di praticità (reperibilità della mazzetta-catalogo, facilità di lettura, elaborabilità dei dati, interazione con la produzione industriale, commercializzazione), che ne fanno un sofisticato strumento di lavoro ormai riconosciuto essenziale per rilievi e progetti del colore in molti paesi europei.

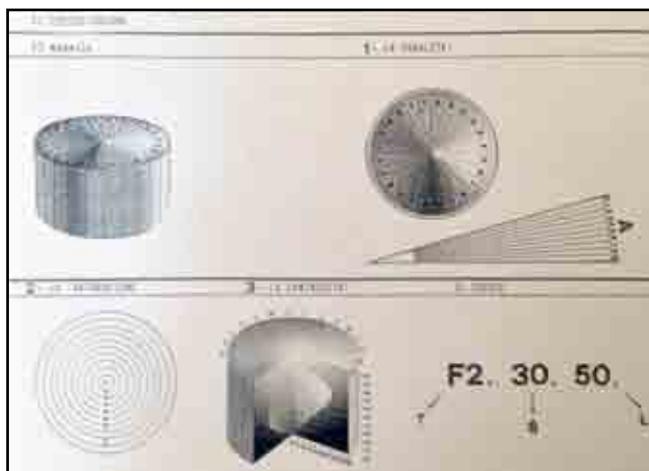
Il *codice-colore* è formato da tre parametri, separati da un punto:

1. T - tonalità, (alfanumerico): esprime il *carattere* del colore (rosso, arancio, blu, verde, ecc.);
2. S - saturazione, (numerico): consiste nella misurazione del-

la intensità di colore;

3. L - luminosità, (numerico): definisce la quantità di luce che un colore riflette»⁵.

Il modello ACC è stato ampiamente sperimentato per il progetto di piani-colore in molte città italiane. Da ultimo, ha visto la sua diretta sperimentazione, da parte del team di ricerca del Prof. Centauro (dipartimento di restauro dell'architettura - Firenze), su una porzione del centro storico di Firenze, il quartiere di San Giovanni, in cui vi è anche una notevole presenza di intonaci sgraffiti.



L'ACC System. La costruzione del codice colore



Tavolozza delle tinte colore rilevate negli edifici con presenza di pitture murali sgraffite nel quartiere di San Lorenzo a Firenze. Da G. A. Centauro, 2011

Il rilievo viene effettuato attraverso la sovrapposizione di più dati derivanti da sopralluoghi effettuati con condizioni di luce differenti durante tutto l'arco della giornata. Il risultato è quello di ottenere dalla media di questi, il colore che più si avvicina a quello acquisito in condizioni di *illuminamento medio naturale indiretto*. Vengono così rilevati: i colori degli intonaci, i colori dei rilievi (bugnati, colonne, timpani, etc.), i colori degli elementi accessori (ringhiere, persiane, etc.).

4.3. Alcune metodologie di indagine non-invasiva sul rilevamento di dati "sensibili" degli intonaci

Di seguito, sono elencati alcuni sistemi avanzati di rilevamento per indagini non invasive, con i rispettivi campi di applicazione, per quanto riguarda la conoscenza e la conservazione delle pitture murali. I risultati ottenuti, oltre a contribuire alla conoscenza dei materiali, delle tecniche di esecuzione degli intonaci e dei tratti dei disegni non visibili non distinguibili ad occhio nudo, permettono di scegliere metodologie adeguate per la conservazione delle testimonianze di questi trattamenti, in accordo anche con il recente concetto di "restauro sostenibile", in termini di compatibilità e utilizzo di materiali locali.

4.3.1. La Spettroscopia infrarossa IR o Spettrofotometria

«La spettrofotometria infrarossa (IR) è una tecnica molto nota in campo chimico e ha notevoli applicazioni anche nel campo dei beni culturali. Si tratta di una tecnica di analisi nella quale sono misurate transizioni tra livelli energetici vibrazionali, che richiedono energia corrispondente a radiazioni nella regione infrarossa dello spettro elettromagnetico, cioè tra 1 e 500 μm .

Con questa tecnica è possibile avere informazioni sui gruppi funzionali presenti nelle molecole che formano il campione e quindi, indirettamente, sulle molecole stesse. Le informazioni sono prevalentemente di tipo qualitativo; l'aspetto quantitativo è scarsamente sfruttato.

Il campione è irraggiato con un intervallo più o meno ampio di radiazioni; le stesse assorbite corrispondono ai gruppi funzionali delle molecole. La risposta è visibile sotto forma di *spettro* e permette di determinare, attraverso i gruppi funzionali, la struttura di alcune molecole contenute nel campione, costituendone un'impronta digitale.

La spettroscopia IR è una tecnica molto comune nei laboratori chimici, per via del semplice utilizzo e del basso costo. Gli strumenti più diffusi lavorano in *Trasformata di Fourier* e sono perciò chiamati FTIR. Inoltre sono attualmente sul mercato strumenti FTIR portatili che consentono di effettuare analisi *in situ* con buone prestazioni.

Metodi per l'acquisizione di spettri IR:

Lo spettro IR di un campione può essere acquisito con varie modalità. Se il campione è sufficientemente trasparente alla radiazione IR si può lavorare in *trasmissione* o in *assorbimento*; i due parametri sono legati dalla relazione seguente: $A_{ss} = \log T^{-1}$

In questo caso l'analisi si effettua su un'aliquota di campione miscelata al sale KBr per formare una pastiglia che si sottopone all'analisi.

Se il campione non è trasparente alle radiazioni è necessario lavorare in *riflettanza*, registrando cioè lo spettro delle radiazioni IR riflesse dalla superficie del campione. Si può misurare la *riflettanza speculare*, cioè le radiazioni riflesse con identica angolazione oppure la *riflettanza diffusa*, cioè le radiazioni riflesse ad angoli differenti.

Mentre le misure in trasmissione richiedono quasi sempre il prelievo di un'aliquota di campione, quelle in riflettanza si prestano ottimamente ad essere effettuate su superfici e quindi, in teoria, sono applicabili *in situ*.

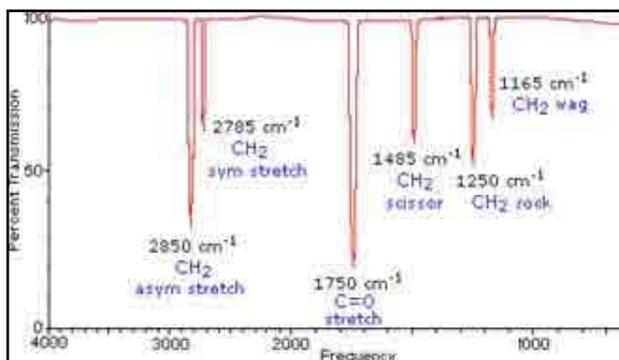
Una modalità particolare di misura IR è quella cosiddetta *Attenuated Total Reflection* o ATR. In questo caso si impiega una sonda con un cristallo di diamante o di altri materiali che viene posto a contatto con la superficie del campione in un'area di circa 1 mm di diametro. Ciò permette di raccogliere lo spettro in riflettanza da uno strato di 2-3 μm del campione.

Lo strumento FTIR portatile mostrato in figura è dotato di sonda ATR a inclinazione variabile che permette di effettuare analisi superficiali senza vincoli di ingombro del campione. L'area analizzata ha un diametro di 1 mm. Range spettrale: 4000-650 cm^{-1} .

Applicazioni e vantaggi dell'IR:

La tecnica IR ha moltissime applicazioni nel campo dei beni culturali, grazie alla capacità di identificare sostanze organiche ed inorganiche. Alcuni esempi sono:

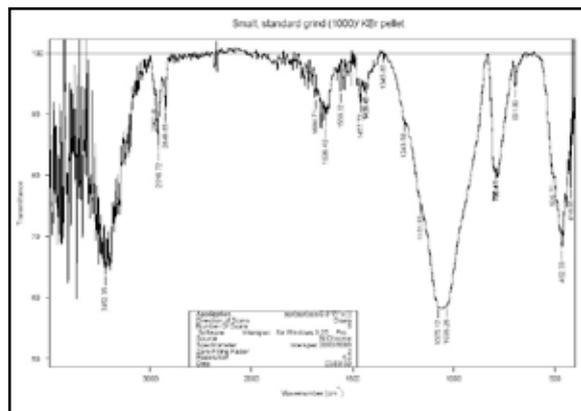
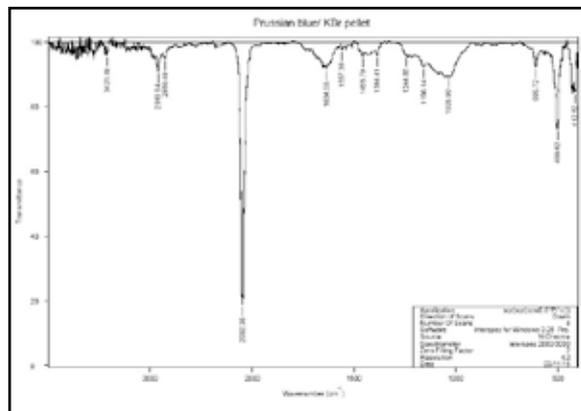
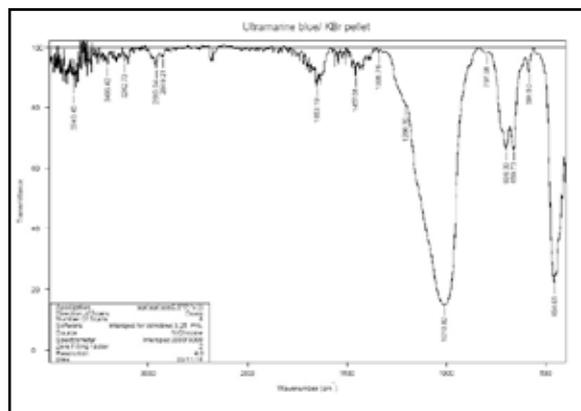
- caratterizzazione di materiali coloranti e di leganti
- identificazione e monitoraggio di processi di degradazione
- caratterizzazione di materiali protettivi



Esempio di spettro IR



Esempio di strumento da banco IR



Per valutare la capacità diagnostica della tecnica IR è sufficiente osservare quanto siano differenti gli spettri in trasmissanza di tre pigmenti blu: il Blu oltremare (sopra), il Blu di Prussia (in mezzo) e lo Smaltino (in basso)»⁶.



Esempio di strumento FTIR - ATR

4.3.2. Spettroscopia Raman

«Questa tecnica, complementare alla tecnica IR, è basata sull'effetto Raman: un campione, irraggiato con luce monocromatica, cioè a λ singola, riemette luce a λ maggiore (energia inferiore) in quanto parte dell'energia viene assorbita per far vibrare i gruppi funzionali delle molecole presenti nel campione che in questo modo possono essere rivelati in maniera analoga alla spettroscopia IR. A differenza dell'infrarosso, tuttavia, non si misura la luce assorbita ma quella che viene restituita o diffusa dai gruppi funzionali dopo l'assorbimento. La risposta è visibile sotto forma di spettro. Anche nel Raman lo spettroscopista esperto sa interpretare lo spettro in termini di gruppi funzionali, mentre l'utente può riconoscere la sostanza che ha fornito lo spettro per confronto con una banca dati.

La strumentazione necessaria per effettuare una misura Raman è costituita da una sorgente laser a λ fissa, da un microscopio per focalizzare il raggio laser sul campione e da un sistema di rivelazione della radiazione Raman emessa dal campione.

Dopo l'irraggiamento con il laser si registra l'energia luminosa riemessa dal campione sotto forma di spettro, che consente di vedere le sostanze presenti in base ai segnali rilevati.

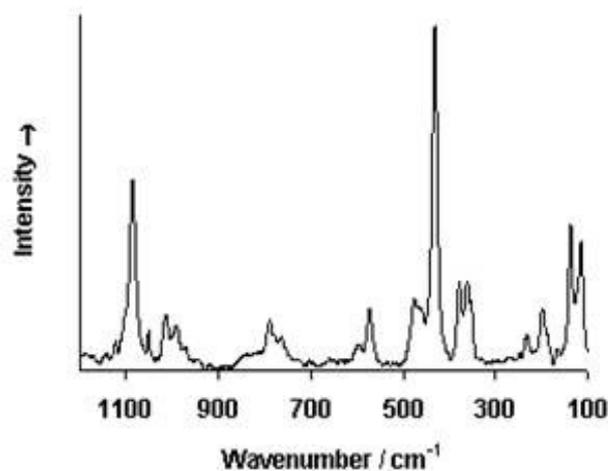


Fig. Spettro Raman del pigmento Blu egiziano. Le bande sono dovute ai gruppi funzionali presenti nel campione.

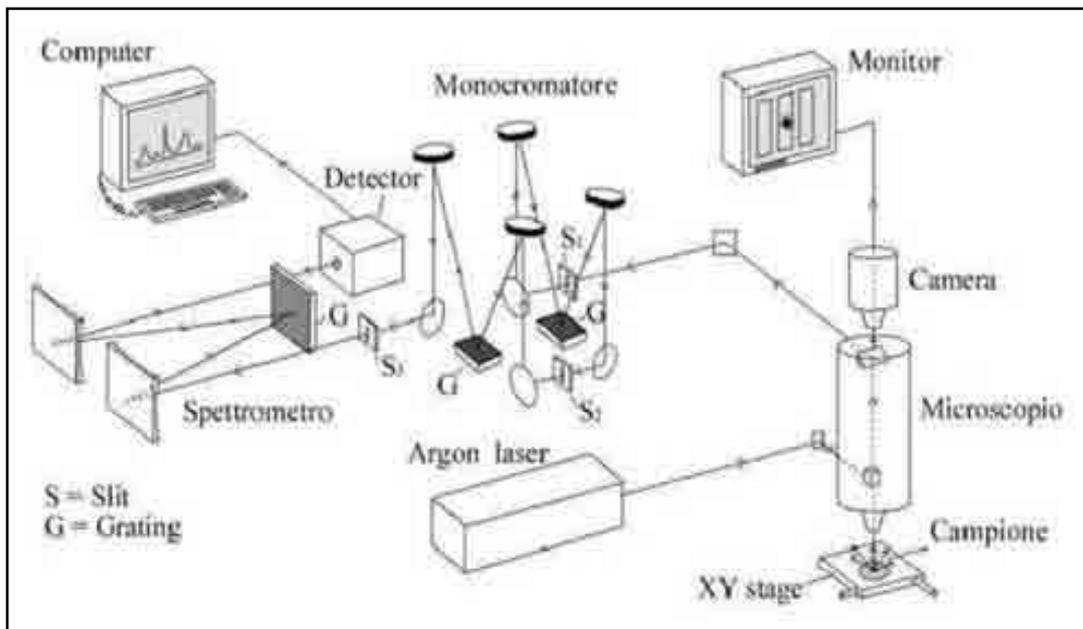
Spettrometri Raman:

Come per la spettroscopia infrarossa, anche in quella Raman sono utilizzati due tipi di strumenti: quelli *dispersivi*, in cui la radiazione diffusa dal campione viene dispersa sequenzialmente con un sistema monocromatore chiamato *reticolo*, e quelli a *Trasformata di Fourier* o FT-Raman, in cui lo spettro Raman è raccolto contemporaneamente su tutto l'intervallo di interesse utilizzando l'algoritmo matematico omonimo.

Negli strumenti da banco si può effettuare l'analisi su tutti i campioni compatibili con le dimensioni del comparto portacampione: particelle depositabili su vetrino, fogli (a lato), piccoli oggetti.

Negli spettrometri Raman dotati di microscopio l'area interessata dall'analisi può essere limitata a poche unità fino ad alcune centinaia di μm^2 , a seconda del laser e dell'obiettivo utilizzati. Gli obiettivi normalmente impiegati vanno da 10x a 100x.

A fronte di questa capacità di risoluzione spaziale risulta obbligatorio sapere esattamente dove si sta effettuando la misura per evitare errori macroscopici; per questo motivo i microscopi Raman sono dotati di una telecamera coassiale con il laser, che permette di visualizzare l'area su cui si sta puntando. Dal punto di vista della profondità di campionamento, l'analisi effettuata con uno spettrometro Raman è di tipo superficiale: le informazioni provengono da uno strato



spesso alcuni μm posto sulla superficie. Da ciò è facile capire che le applicazioni più utili della spettrometria Raman sono quelle in cui si è interessati a caratterizzare le proprietà superficiali di un campione, es. i prodotti di degradazione, i pigmenti su un dipinto o su un manoscritto, ecc.

Alcuni strumenti hanno la possibilità di variare la profondità di campionamento mediante un dispositivo noto come confocalità, che permette di ricevere l'informazione da pacchetti a spessore variabile dal campione, a patto che questo permetta il passaggio della radiazione laser.

Sistemi portatili:

Nei sistemi portatili, con i quali è possibile fare analisi in situ, la radiazione laser e la radiazione Raman vengono trasportate mediante un cavo a fibra ottica e una sonda puntata sul campione: ciò permette di avvicinarsi a distanze minime (frazioni di mm) alle superfici che si vuole analizzare.

Uno dei vantaggi dell'impiego di strumenti Raman portatili rispetto agli strumenti da banco è la possibilità di effettuare analisi su campioni molto ingombranti, che non potrebbero essere inseriti nel comparto portacampione di uno strumento da banco: l'utilizzo di una sonda esterna consente di non

avere vincoli.

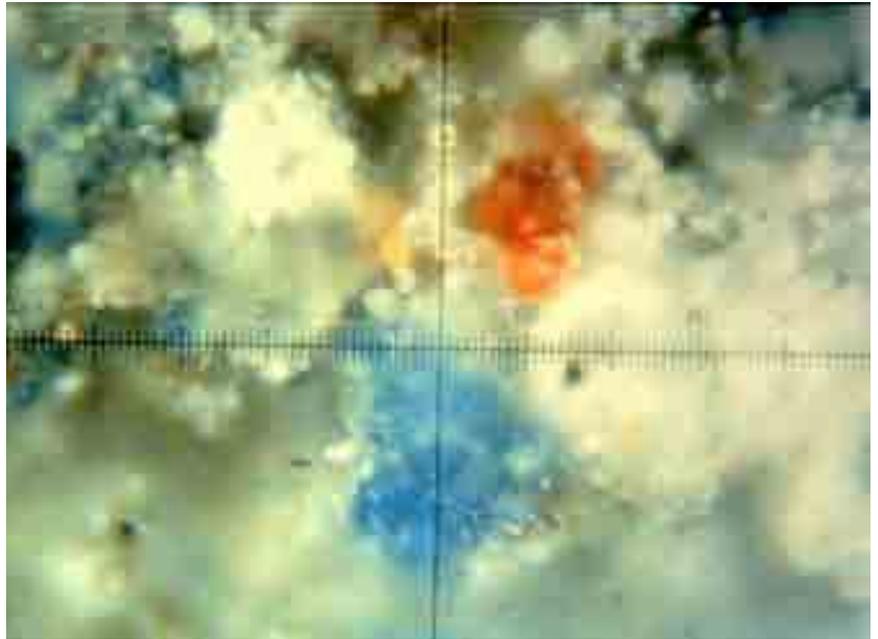
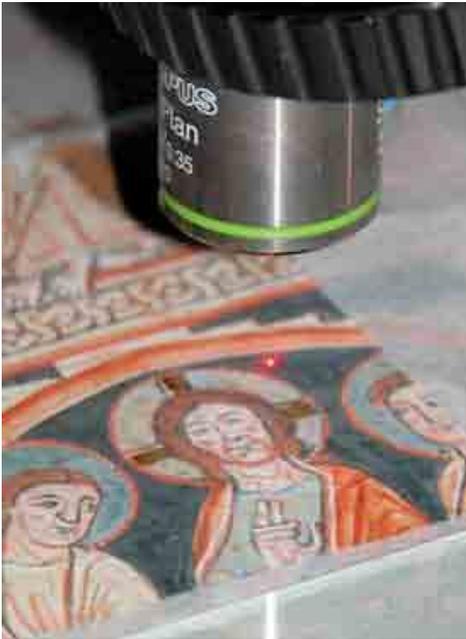
Per quanto riguarda l'analisi degli affreschi, la caratterizzazione dei pigmenti è molto importante per collocare storicamente il manufatto e per decidere il miglior intervento restaurativo.

Se non è possibile effettuare un prelievo di campione, l'uso di uno spettrometro Raman portatile costituisce il modo più sicuro per identificare i pigmenti.

Per ottenere uno spettro Raman ottimale, il campione deve essere posto alla corretta distanza focale dell'obiettivo. Negli strumenti da banco ciò è realizzato con uno stage che permette di effettuare movimenti micrometrici nelle direzioni xyz; inoltre il portacampione è solidale con lo strumento e non risente di vibrazioni esterne. Negli strumenti portatili, con cui normalmente si analizzano oggetti inamovibili, è possibile movimentare la sonda per ottenere la messa a fuoco corretta, tuttavia, siccome il campione non è solidale con lo strumento, c'è una forte possibilità che vibrazioni esterne inficino la misura causando la perdita di messa a fuoco.

Applicazioni archeometriche:

La spettroscopia Raman è una tecnica attualmente molto uti-



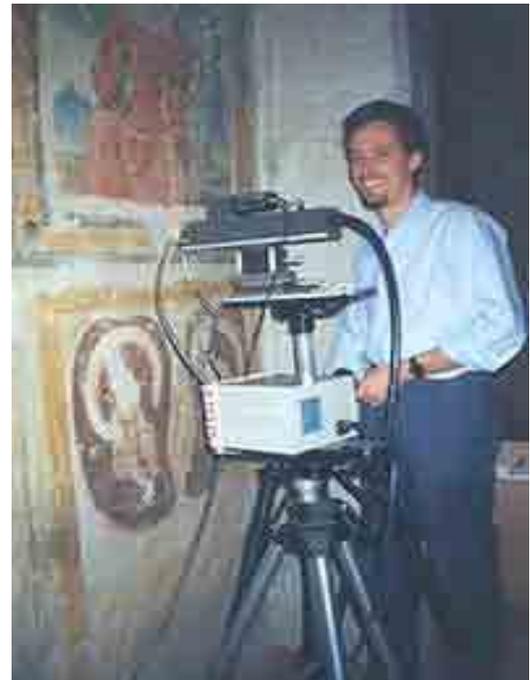
Analisi di un pigmento di aspetto macroscopicamente grigio.

lizzata nel campo dei beni culturali, grazie al fatto di essere completamente non distruttiva e di permettere l'esecuzione di misure *in situ*, cioè direttamente sul campione senza necessità di asportarne una parte per effettuare la misura in laboratorio.

Le applicazioni principali della spettroscopia Raman in campo archeometrico sono nel settore del riconoscimento di pigmenti sui manufatti pittorici, in particolare sugli affreschi e dell'autenticazione di materiali preziosi.

Per valutare le potenzialità della spettroscopia Raman nell'analisi dei pigmenti, è sufficiente osservare quanto gli spettri Raman di quattro pigmenti rossi siano differenti tra di loro, consentendo di differenziare pigmenti che macroscopicamente appaiono simili o identici.

Altre applicazioni della spettroscopia Raman sono nella caratterizzazione di composti organici ed inorganici in materiali di origine animale e vegetale, oppure in prodotti di degradazione»⁷.

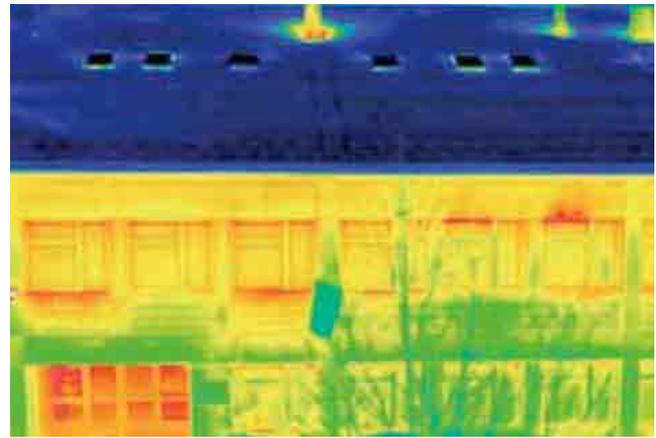


4.3.3. Termografia

«La termografia ad infrarossi (IR) è una tecnica di indagine non distruttiva in grado di determinare le temperature di una superficie attraverso la misura della radiazione infrarossa emessa. La mappa delle temperature viene visualizzata direttamente sullo schermo di una termocamera. Alla radianza (luminosità) di ogni pixel è associato il valore di temperatura corrispondente al punto del corpo esaminato. Il termogramma, quindi, è una rappresentazione verosimile dell'oggetto indagato, dove si riconoscono proporzioni e forma.

Perché utilizzare una termocamera? Fino a qualche tempo fa si sono utilizzati prevalentemente termometri ad infrarosso. Questa metodologia è affidabile ed utile per misurare singoli punti di temperatura ma, quando si devono rilevare aree o componenti di grandi dimensioni, i tempi aumentano ed è possibile lasciarsi sfuggire alcune aree. Con la termocamera è come se utilizzassimo contemporaneamente decine di migliaia di termometri ad infrarossi grazie alla risoluzione del sensore. Per tali motivi la termografia ha quali principali vantaggi l'assoluta non invasività della prova con la possibilità di ripetere le misure nel tempo e verificare i mutamenti al cambiare delle condizioni. Ciò consente di limitare drasticamente il numero di saggi distruttivi e di individuare a campione con l'IRT (immagine infrarosso termico) i punti significativi per il saggio. È possibile effettuare un rilievo termografico senza la necessità di utilizzare ponteggi o sistemi di elevazione con estrema rapidità di esecuzione delle prove. Ancora, l'analisi di vaste aree in poco tempo consente nessuna interruzione delle normali attività svolte all'interno dell'edificio (ad es. il ciclo produttivo di una fabbrica o di un impianto). È importante poter individuare problematiche connesse all'edificio in modo semplice, rapido e accurato, utilizzando un termometro a contatto è facile non accorgersi di un problema critico in un edificio. L'utilizzo di una termocamera offre invece un quadro completo della situazione e la possibilità di realizzarne un rapporto diagnostico dettagliato. Ciò consente al professionista di operare mediante ispezioni più facili da effettuare con la possibilità di individuare problemi non rilevabili normalmente tramite l'ispezione visiva, mediante l'identificazione di carenze senza distruggere la struttura e documentandone le criticità rilevate tramite la elaborazione di report specifici (metodo non distruttivo).

Le caratteristiche principali di una termocamera sono dovute alla qualità del sensore del dispositivo che trasforma la radiazione infrarossa in impulso elettrico, ciò determina la risoluzi-



Esempio di immagine termografica

zione della termocamera, ovvero la dimensione reale di un pixel ad una certa distanza. La sensibilità del dispositivo rappresenta invece una differenza minima di temperatura rilevabile dalla termocamera. Una soglia di sensibilità molto bassa permette di rilevare anche minime differenze di temperatura, garantendo l'individuazione di stati di degrado anche non in fase avanzata o di differenti materiali presenti nella struttura (ad es. infiltrazione d'acqua, umidità di risalita, tessitura muraria). L'intervallo di misura descrive il valore massimo e minimo di temperatura misurabili. Un valore elevato di temperatura massima (500/1000/1500°C) permette di operare non solo in ambito edile, ma anche nel settore industriale. Alcune termocamere permettono di selezionare l'intervallo di temperature più opportuno a seconda dell'applicazione desiderata.

Le applicazioni relative al settore edilizio consentono di individuare una serie di problematiche, tipo la presenza di: umidità, ponti termici, infiltrazione d'aria (serramenti), problemi connessi all'isolamento termico, infiltrazioni d'acqua sui tetti, tubazioni non isolate, ventilazione e riscaldamento, riscaldamenti a pavimento, uscite di ventilazione. Inoltre: evidenziare lacune nei quadri elettrici e nei componenti idraulici, piuttosto che analizzare le dispersioni termiche, individuare una tessitura muraria, lo stato degli intonaci o verificare lo stato di aderenza dei rivestimenti ceramici. Un'altra interessante applicazione della termografia è quella volta al settore del restauro dei beni culturali, soprattutto per quan-

to riguarda le pitture murali. Da i dati termografici siamo in grado di estrapolare, lo stato di coesione degli intonaci, nonché sollevamenti localizzati della pellicola pittorica. Inoltre ci consente di visualizzare la tessitura muraria sotto l'intonaco, consentendo quindi, di intervenire in punti specifici evitando il danneggiamento di strutture nascoste»⁸.

«L'evidenziazione di aggiunte, modificazioni (tamponature di porte e finestre) ed elementi celati all'interno dell'apparecchiatura muraria così come di discontinuità nei materiali con evidenziazione di elementi lapidei (archi, architravi, portali, capitelli, lesene, cornici, paraste, etc.), laterizi (archi, interventi di riparazione, etc.), elementi metallici (chiodi, chiavi, staffe catene) o la presenza di elementi strutturali afferenti a precedenti fasi costruttive (pilastri, architravi, archi di scarico) consente spesso la ricostruzione tanto delle caratteristiche tipologico-geometriche delle apparecchiature murarie quanto l'individuazione di punti di particolare debolezza che sono di frequente all'origine di dissesti (presenza di discontinuità nelle murature quali aperture tamponate senza ammortature, vecchie canne fumarie, riprese murarie debolmente ammortate, etc.)»⁹.

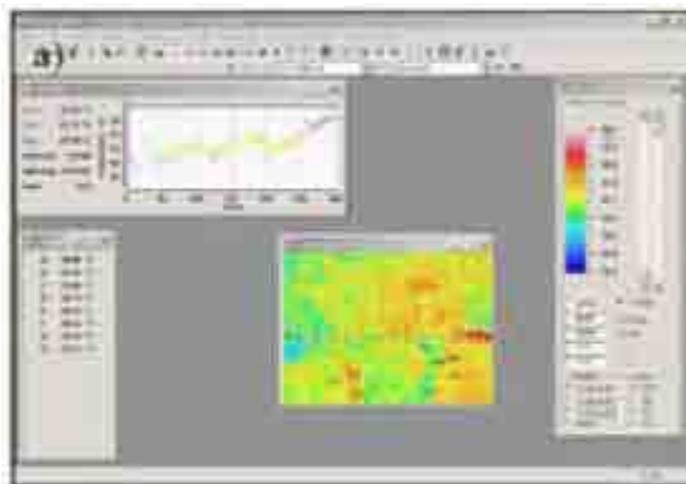


Figura 2-7 a) Esempio di termogramma in fase di elaborazione



b) Telecamera AVIO TVS-600 [6.]

4.3.4. Vibrometria laser-Doppler

«La vibrometria laser-Doppler è una tecnologia che permette di rilevare la velocità di vibrazione degli elementi esaminati senza prevederne il contatto e, pertanto, è indicata per situazioni in cui l'uso di sistemi a contatto non è possibile o è comunque sconsigliato, come nel settore dei Beni Culturali. Tale tecnologia viene utilizzata per lo studio di fenomeni di delaminazione e distacco di finiture superficiali di alto valore artistico (affreschi, mosaici) e per la caratterizzazione qualitativa di rivestimenti superficiali e strutture murarie, relativamente al grado di ammassamento e di vincolo, o alla presenza di lesioni. La restituzione dei dati avviene tramite mappe a colori di facile interpretazione riportanti i valori misurati sovrapposti a un'immagine fotografica dell'oggetto esaminato»¹⁰.

«L'idea alla base del Laser Doppler Vibrometer è la sostituzione dei sensi dell'uomo con un sistema di misura in grado di acquisire informazioni ed eventualmente di elaborarle. A questo strumento occorre generalmente associarne un altro in grado di eccitare la struttura: attuatori acustici, piezoelettrici o meccanici che fanno vibrare le superfici¹¹.

Il LDV è in grado di studiare il modo in cui esse vibrano e di tracciare mappe 2D o 3D. Il principio alla base di questa tecnica d'analisi è che una determinata area di un affresco in cui sia presente un difetto vibra "a una velocità maggiore" delle aree circostanti. La tecnica LDV permette di ottenere informazioni quantitative sul difetto e sulla sua evoluzione temporale, può essere inoltre applicata anche a strutture mas-

sive come torri o chiese.

Questo metodo presenta i requisiti citati nell'introduzione:

- Assoluta non intrusività;
- Misure remote;
- Banda di risposta estesa;
- Alta sensibilità;
- Registrazione digitale dei dati;
- Portabilità.

Generalmente tutti questi sistemi sono controllati da PC e permettono di ottenere dati digitali che possono essere trasferiti in altre applicazioni. Sono presenti inoltre alcuni svantaggi. Innanzi tutto il sistema di misura deve essere completamente isolato dalle vibrazioni del terreno, che possono nascere per molte ragioni, basta pensare a una strada circostante. Queste sono una fonte di inquinamento dei risultati. Un altro problema non trascurabile è che questo metodo è applicabile a grandi strutture e necessita di una distanza tra strumento e oggetto di almeno 10-15 m. Questo strumento usa l'effetto Doppler per acquisire a distanza la velocità di vibrazione. L'effetto Doppler, o spostamento Doppler della frequenza, è dovuto al moto relativo della sorgente e dell'osservatore: quando la sorgente di un'onda e un osservatore sono in moto relativo, c'è una differenza tra la frequenza emessa dalla sorgente e la frequenza ricevuta dall'osservatore. Le vibrazioni superficiali inducono lo spostamento Doppler della frequenza (Doppler frequency shift) sul raggio laser incidente, questo shift è connesso linearmente alla componente della velocità nella direzione del raggio. Uno schema caratteristico di interferometro è quello di Mach-Zender come mostrato in figura.



- **Non necessita di regolazioni**
- **Misura fino a 50 metri**
- **Alta sensibilità**
- **Realizzazione robusta per misure in campo**
- **Range di misura velocità: da 1 $\mu\text{m/s}$ a 5 mm/s**
- **Gamma in frequenza: da 0 a 25 kHz**
- **Distanza di lavoro: da 5 m a 50+ m**
- **Lunghezza d'onda: 532 nm**
- **Uscita: velocità e FM**
- **Dimensioni e peso: 48.2x25.4x21.6 cm - 12 kg**

Il vibrometro laser Doppler a scansione

Un ostacolo è il fatto che lo spostamento Doppler generalmente è molto minore della frequenza fondamentale del laser, circa 0.92%. Per superare questo problema si fa ricorso all'interferometria. La luce del laser viene divisa in un "raggio di riferimento" e un "raggio di misura" da un divisore di fascio (Beam Splitter 1 (BS1)). Quest'ultimo passa attraverso un altro separatore (BS3) e viene concentrato da una lente sulla superficie vibrante. Il raggio riflesso torna in BS3 che lo devia in BS2. In BS2 il raggio riflesso interferisce con il "raggio di riferimento". L'intensità risultante dalla combinazione dei due raggi varia sinusoidalmente con la differenza di fase dei due raggi che può essere costante o meno a seconda che l'oggetto sia fermo o vibri a velocità v .

Nel primo caso la differenza di fase è costante e determinata unicamente dal cammino ottico L percorso dalla luce tra la superficie e il beamsplitter BS2. Se invece la superficie si muove, la differenza di fase diventa tempo variante e in questo secondo caso è possibile esprimere la fase come prodotto di una pulsazione variabile nel tempo (frequenza istantanea) per il tempo stesso; il valore di questa frequenza è pari al valore dello spostamento in frequenza (effetto Doppler) dovuto a v . Come è infatti ben noto qualunque onda riflessa da una superficie in movimento subisce uno shift Doppler fD della propria frequenza proporzionale alla velocità della superficie (v) e alla lunghezza d'onda (λ) della radiazione: $fD \propto 2v/\lambda$.

Generalmente i vibrometri utilizzano He-Ne lasers e il doppler frequency shift fD risulta circa 3.16 kHz ogni mm/s.

I segnali ottici vengono poi convertiti in segnali elettrici dai photo detectors PD1 e PD2. Il segnale risultante in uscita dall'amplificatore operazionale è: $s(t) \propto A2\cos(2fDt)$ dove A è l'ampiezza del raggio laser. Gli ultimi componenti necessari sono un fotodiodo (o una coppia) e un demodulatore FM che estrae dal segnale Doppler il valore di v come una tensione analogica. Per determinare anche la direzione del vettore velocità istantanea si possono utilizzare celle di Bragg (come mostrato in figura) o una manipolazione elettronica dei raggi ricombinati. In ambedue i casi, questi dispositivi introducono uno shift in frequenza in uno dei rami dell'interferometro o nel segnale del fotodiodo e permettono di riconoscere il verso attraverso la sovrapposizione di un vettore 'virtuale' di velocità. Tutti i sistemi SLDS sono gestiti da un PC, per cui i risultati sono forniti in vari formati digitali (immagini BMP o JPG, file UFF, TXT, filmati AVI) facilmente trasferibili a pacchetti software esterni di post processing o analisi dei dati. Lo Scanning Laser Doppler Vibrometer può eseguire velocemente una serie di misure di velocità senza contatto su una griglia di punti della struttura sotto test: i moderni SLDV

possono esplorare fino a 100 punti al secondo, per un numero totale di punti superiore ai 100.000. Nella maggior parte dei casi il range di velocità di un SLDV è di 10 m/s, con un limite superiore di frequenza di 200 kHz. La risoluzione è dell'ordine del $\mu\text{m/s}$ e la potenza del raggio laser del decimo di mW. Una potenza così ridotta garantisce la non intrusività dello strumento di misura, preservando l'oggetto da eventuali danneggiamenti, e non arreca pericolo per l'ambiente circostante, quindi non richiede misure di sicurezza. Le caratteristiche elencate, insieme a quella di permettere misure senza contatto, rendono la vibrometria laser Doppler a scansione una tecnologia indicata per situazioni in cui l'uso di sistemi a contatto, ad es. gli accelerometri, non è possibile o è comunque sconsigliato, come nel caso di strutture ad alta temperatura, strutture non raggiungibili da operatore umano, strutture leggere o mobili, sulle quali in generale non sia possibile applicare sensori, proprio come nel caso del monitoraggio dello stato di salute di beni culturali. In tutti questi casi l'impiego di accelerometri può inficiare l'accuratezza delle misure per l'effetto di massa aggiunta o addirittura danneggiare in modo più o meno importante la struttura stessa. Inoltre, se il numero di punti su cui devono essere eseguite le misure è grande, sarebbe necessario posizionare sulla struttura un numero equivalente di trasduttori, un'operazione sicuramente lunga e costosa. Generalmente il segnale laser deve passare attraverso un filtro passa-alto a causa della presenza quasi ovunque di vibrazioni a bassa frequenza, come per esempio quelle generate da una strada trafficata. In molti casi filtrare i segnali disturbanti risulta particolarmente impegnativo, per cui si ricorre all'isolamento acustico dell'area di lavoro»¹².

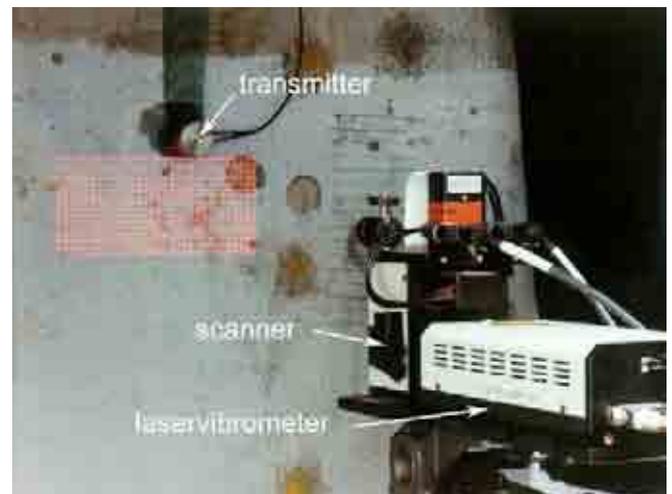


Fig. - Un sistema SLDV

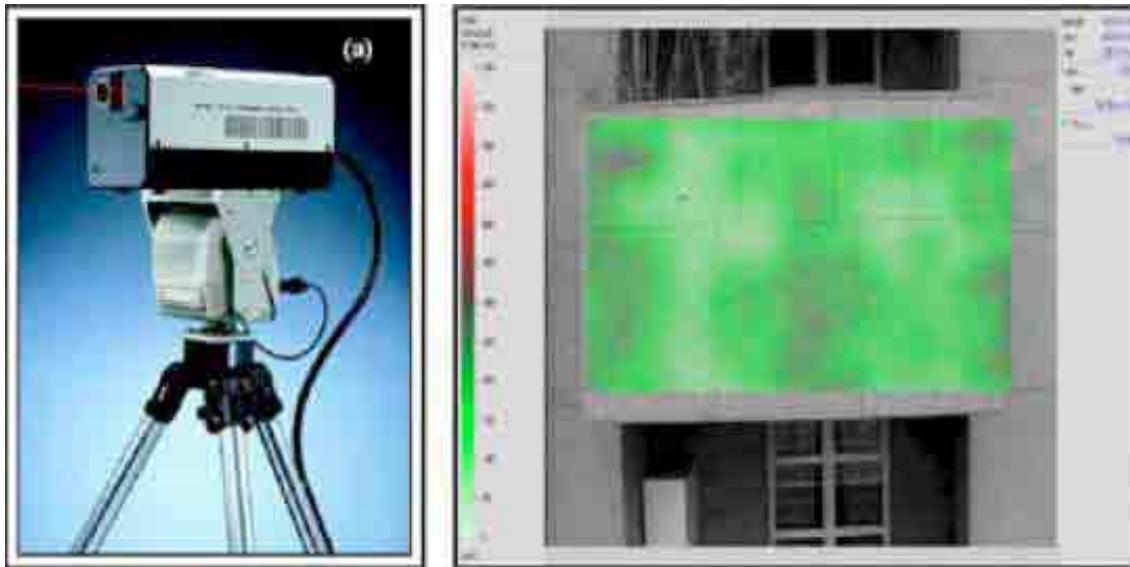


Fig. - Testa ottica di un vibrometro commerciale e mappa di vibrazione misurata.

4.3.5. Sistemi a scansione laser a luce strutturata

«Il rilievo della forma di oggetti tridimensionali è un processo che ha, recentemente, assunto un ruolo significativo in svariate applicazioni industriali, soprattutto nell'ambito del Reverse Engineering. La procedura di generazione di un modello CAD di un oggetto esistente può essere schematizzata in quattro fasi principali: calibrazione del sistema, acquisizione dati, elaborazione delle informazioni e generazione delle superfici. Nel corso di questi ultimi anni, le tecnologie di scansione tridimensionale si sono rapidamente evolute e sono stati proposti diversi sistemi di digitalizzazione che possono essere distinti in due principali categorie [Várady et al. 1997]: sistemi a contatto e sistemi non a contatto. I sistemi a contatto prevedono la digitalizzazione della superficie mediante tracciatura con palpatore meccanico. Si tratta di una misura puntuale, e la scansione di un intero oggetto può richiedere una complessa movimentazione del sensore, con tempi di acquisizione piuttosto lunghi. L'evoluzione dei dispositivi e sensori ottici ha permesso lo sviluppo di tecniche di rilievo senza contatto. Questi metodi, che consentono una notevole riduzione dei tempi d'acquisizione, si suddividono in tecniche passive e tecniche attive. Le tecniche passive non richiedono alcuna fonte di energia aggiuntiva. A questo gruppo appartengono le tecniche monoculari shape-from-X

e i metodi di visione stereo. Le tecniche attive si basano sulla scansione della superficie da rilevare con una sorgente di luce (luce laser o luce bianca) che interagisce con i dispositivi di acquisizione. Generalmente, le tecniche ottiche di Reverse Engineering consentono il rilievo di superfici complesse mediante scansioni multiple realizzate movimentando la strumentazione ottica e/o l'oggetto da acquisire. L'allineamento delle nuvole di punti è eseguito sfruttando particolari riferimenti geometrici presenti nelle zone di sovrapposizione di rilievi adiacenti, oppure controllando la posizione del digitalizzatore, o dell'oggetto, con dispositivi di visione indipendenti. Tuttavia, le soluzioni proposte si basano su procedure piuttosto complesse che, fino ad oggi, hanno limitato la diffusione ed applicazione delle tecniche di Reverse Engineering in campo industriale. Questo lavoro presenta un'attività di ricerca riguardante lo sviluppo di un sistema di scansione senza contatto che consente di superare alcuni dei limiti descritti. Il sistema, che comprende l'uso di una sorgente di luce strutturata e di un sensore per l'acquisizione delle immagini, si basa sulla combinazione di una tecnica di codifica della luce con il principio della geometria epipolare. La scansione di superfici complesse non richiede un'attrezzatura indipendente per il controllo della posizione del dispositivo ottico. Il sistema può, infatti, gestire scansioni multiple utilizzando