

Ministero per i Beni Culturali e Ambientali

ISTITUTO CENTRALE DEL RESTAURO

**PIANO PILOTA PER LA CONSERVAZIONE
PROGRAMMATA DEI BENI CULTURALI IN UMBRIA**

PROGETTO ESECUTIVO

MINISTERO PER I BENI CULTURALI E AMBIENTALI
ISTITUTO CENTRALE DEL RESTAURO

PIANO PILOTA PER LA CONSERVAZIONE
PROGRAMMATA DEI BENI CULTURALI IN UMBRIA

PROGETTO ESECUTIVO

- allegato 1 -

I N D I C E

PARTE PRIMA: PROPOSTE DI TESTI DIDATTICI PER GLI ADDETTI
ALLA CONSERVAZIONE

- 1 CAUSE AMBIENTALI DEL DETERIORAMENTO DEI BENI
CULTURALI Pag. 3
- 2 METODI OTTICI DI RILEVAMENTO Pag. 27
- 3 CARATTERISTICHE TERMOIGROMETRICHE DI AMBIENTI,
MATERIALI, STRUTTURE Pag. 63
- 4 COMPOSIZIONE, MOTO E EFFETTI DELLE POLVERI Pag. 81
- 5 METODI DI RILEVAMENTO DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO Pag. 115
- 6 METODI DI INTERVENTO BASATI SUL CONTROLLO DELLE
CONDIZIONI TERMOIGROMETRICHE DI AMBIENTI MATE-
RIALI E STRUTTURE Pag. 137
- 7 METODI DI PROSPEZIONE ARCHEOLOGICA Pag. 153

PARTE SECONDA: NOTE INFORMATIVE

- 8 METODI NON DISTRUTTIVI DI CARATTERIZZAZIONE DELLE
PROPRIETA' MECCANICHE DI MATERIALI E STRUTTURE Pag. 175
- 9 METODI DI ANALISI E CARATTERIZZAZIONE DEI MATE-
RIALI COSTITUTIVI DEI BENI CULTURALI Pag. 189

PARTE TERZA: CONTRIBUTI DI RICERCA

- 10 UNA NUOVA TELA DA RIFODERO PER DIPINTI Pag. 211
- 11 RILASSAMENTO DEGLI SFORZI E INSTABILIZZAZIONE INCI-
PIENTE IN MODELLI DI TELE DI RIFODERO TENSIONATE Pag. 225

PARTE QUARTA: PROPOSTE DI RICERCA

- 12 PROPOSTA DI UNA RICERCA SUL CONTENUTO DI UMIDITA'
E SUI DIFETTI D'ADESIONE DI INTONACI AFFRESCATI Pag. 239
- 13 PROGETTO DI RICERCA SUGLI SCAMBI DI UMIDITA'
TRA MATERIALE CARTACEO AMMASSATO E AMBIENTE Pag. 251

P A R T E P R I M A

PROPOSTE DI TESTI DIDATTICI PER GLI ADDETTI ALLA
CONSERVAZIONE

1 CAUSE AMBIENTALI DEL DETERIORAMENTO DEI BENI CULTURALI

M. Paribeni
G. Santariga

INDICE ANALITICO1 ESAME GENERALE DEI FENOMENI DI DETERIORAMENTO1 1 Premessa

Natura e scopo del testo, diretto a soddisfare esigenze operative sulla base di conoscenze e informazioni elementari.

1 2 Impostazione generale dello studio dei fenomeni di deterioramento

I vari meccanismi delle interazioni tra l'oggetto-opera d'arte e i fattori ambientali; il deterioramento come prodotto di scambi di materia e di energia nelle varie forme (meccanica, termica, chimica), e di eventi biologici provocati o attivati dalle interazioni anzidette.

1 3 Possibilità e limiti della metodologia generale1 4 Il metodo "caso per caso"

Uno schema pratico, basato sull'analisi e sull'interpretazione "caso per caso" dei fenomeni che si manifestano e dei fattori da cui i fenomeni stessi sono causati, fornisce risultati certamente validi per la comprensione del caso considerato, ma di massima non generalizzabili. E' però spesso possibile l'utilizzazione prudente di almeno alcuni dei risultati raggiunti.

2 FATTORI DI DETERIORAMENTO2 1 Criteri di classificazione

Classificazione secondo l'origine naturale, antropica (diretta o indiretta), e accidentale; sua utilità nella ricerca delle soluzioni conservative.

Classificazione secondo la natura fisica, chimica, biologica; sua utilità per l'individuazione delle grandezze capaci di rappresentare i diversi fattori.

2 2 Grandezze atte a rappresentare i fattori e misura di esse

Sono quelle capaci di caratterizzare i fattori in argomento, determinandone i più importanti aspetti materiali e obiettivamente valutabili, nonchè gli effetti che ne derivano.

2 2 1 Grandezze che caratterizzano i fattori fisici (temperatura degli oggetti e dell'aria; umidità relativa dell'aria; velocità dell'aria; contenuto d'acqua in fase liquida, di vapore, solida; presenza di flussi radianti; eventuali sollecitazioni meccaniche del tipo statico o dinamico; vibrazioni).

2 2 2 Aspetti e parametri propri dei fattori chimici
(aggressivi gassosi, liquidi, solidi; metodi di
analisi per il riconoscimento delle specie e per
la valutazione dell'attività).

2 3 Norme d'esecuzione delle misure e dei controlli
Con speciale riguardo a quelli che possono essere esegui-
ti da personale non specializzato e con apparecchiature
semplici.

3 CLASSIFICAZIONE DEI BENI CULTURALI

Verrà eseguita con il fine di individuare categorie caratteriz-
zabili in funzione degli effetti che su di esse producono i
fattori ambientali di deterioramento.

3 1 Classificazione secondo le condizioni di conservazione
Opere d'arte all'aperto o conservate in ambienti chiusi.

3 2 Classificazione secondo i materiali costitutivi
Opere d'arte in pietra, metalliche, in legno, cotto o
ceramica, carta, ecc.

3 3 Classificazione in relazione alla complessità delle strut-
ture
Strutture omogenee o complesse; caratteristiche di stabi-
lità dei diversi elementi costitutivi.

3 4 Procedimenti per la valutazione degli effetti dei fattori
di deterioramento
Grandezze atte a rappresentare gli effetti; strumenti e
metodi di misura.

BIBLIOGRAFIA

SINTESI DEI PRINCIPALI CONTENUTI

0 PREMESSA

Il problema della conservazione delle opere d'arte
- per chi voglia coglierne soltanto l'aspetto strettamente tec-
nico-esecutivo - deve essere affrontato cercando di rispondere
ordinatamente a una serie di quesiti che si inquadrano nelle
due classi d'argomenti afferenti:

- a) all'individuazione delle proprietà dei materiali che costi-
tuiscono l'oggetto-opera d'arte: cioè alla conoscenza suf-
ficientemente approfondita delle modalità con cui i mate-
riali possono reagire, singolarmente o per interazione re-
ciproca nel caso di oggetti complessi, alle azioni che pro-
vengono dall'ambiente esterno;
- b) alla individuazione delle proprietà dell'ambiente di conser-
vazione e alla conoscenza dei modi in cui, in dipendenza
delle anzidette proprietà, l'ambiente è in grado di agire
sul bene culturale provocando, in forma diretta o indiretta,
modifiche delle proprietà dei materiali di cui esso è com-
posto.

Va peraltro subito rilevato che muovendo da una im-
postazione siffatta, la prima e più agevole deduzione a cui si
perviene indica con chiarezza che, in linea di principio, il
problema in argomento, per ragioni legate alla sua propria na-
tura, deve ritenersi suscettibile di soluzioni particolari,
individuabili sulla base di osservazioni che sono pienamente
significative soltanto per i singoli casi specifici di volta
in volta esaminati.

Sembra tuttavia possibile e lecito, ed anche utile
ai fini della migliore comprensione di tutti i termini del
problema, ricercare gli aspetti comuni che si presentano nel-
le differenti singole manifestazioni del problema stesso, e
tentarne una trattazione generale. Tra i diversi procedimenti
logici che potrebbero essere suggeriti allo scopo di raggiun-
gere questo fine, sarà brevemente illustrato e discusso quel-
lo fondato sulla analisi del comportamento di un modello imma-
ginario, sufficientemente elementare per poter essere studiato
in forma generale, ma tuttavia capace di rappresentare, sia
pure in modo parziale e differentemente incompleto, il compor-
tamento dei fatti reali.

1 ASPETTI GENERALI DEI PROCESSI DI DETERIORAMENTO

Il deterioramento dei materiali che costituiscono un oggetto qualsiasi, per esempio un oggetto-opera d'arte, è un processo naturale, progressivo e inarrestabile, che deve necessariamente concludersi con la distruzione dei materiali stessi.

Questo enunciato, al di là della sua incontrovertibile e quasi lapalissiana evidenza, fornisce una precisa indicazione sul procedimento mentale più idoneo per arrivare a immaginare il modello teorico di cui si è accennato.

L'esistenza di tutti i corpi costituenti il nostro universo è accompagnata, e di massima condizionata, da fenomeni che si rendono evidenti attraverso il mutamento dei valori di una o più delle grandezze fisiche che possono essere scelte per rappresentare, dal particolare punto di vista che di volta in volta interessa, le condizioni in cui, in un determinato istante, vengono a trovarsi i corpi considerati.

Questo concetto può essere espresso, in modo più conciso, più rigoroso e senza tema di limitarne le generalità, utilizzando il linguaggio proprio della termodinamica, secondo il quale i fenomeni anzidetti, di modificazione dei valori delle grandezze assunte come caratteristiche, si definiscono trasformazioni termodinamiche.

Come è noto, si può affermare che queste trasformazioni sono la diretta conseguenza di uno squilibrio che si manifesta tra i due enti fondamentali cui fa riferimento il ragionamento termodinamico, cioè tra il sistema e il mezzo. Intendendosi per sistema il corpo o la porzione di materia in qualche modo delimitata che si vuole studiare, e per mezzo il resto dell'universo (in effetti soltanto la parte di questo che può effettivamente interagire con il sistema). Mentre la condizione di squilibrio nasce ogni volta che una o più delle grandezze fisiche prescelte per rappresentare quello che si chiama lo stato del sistema o del mezzo, assumono nei due enti valori diversi per cause che possono nascere nel sistema o nel mezzo, per la natura propria dei due enti stessi o per cause o interventi accidentali.

Nel mondo dei fatti reali, qualunque trasformazione alla quale un sistema è sottoposto, è causata da squilibri d'entità finita: e per ciò stesso è di tipo irreversibile, nel senso che il sistema non può essere ricondotto allo stato iniziale ripercorrendo tutti gli stati intermedi attraverso i quali è passato. Di conseguenza la trasformazione lascia necessariamente nel sistema o nel mezzo, o in ambedue, un segno tanto più importante e in qualche modo più gravemente peggiorativo della situazione globale precedente alla trasformazione, quanto più elevato è il suo grado d'irreversibilità.

Per esempio, se la trasformazione reale comporta un trasferimento di calore dal sistema al mezzo (o viceversa), è necessario, affinché la trasformazione possa avvenire, che esista una differenza di temperatura tra i due enti (e naturalmente anche all'interno di essi), cioè una condizione di non equilibrio. Poiché il trasferimento di calore avviene esclusivamente dall'ente a temperatura maggiore a quello a temperatura minore, consegue che al termine della trasformazione, la temperatura media del complesso sistema-mezzo è minore di quella che esisteva prima della trasformazione, a meno che, durante lo svolgersi di questa, non siano avvenuti altri fenomeni. Consegue pure che la trasformazione considerata non può mai avvenire nel senso inverso: cioè è irreversibile, con un grado di irreversibilità tanto maggiore quanto più grande è, nel caso esaminato, la diminuzione della temperatura media. E poiché tale diminuzione è tanto più grande quanto maggiore è la differenza di temperatura tra sistema e mezzo, mentre proporzionalmente a questa differenza cresce la velocità della trasformazione, si può dedurre in generale:

- a) che il grado d'irreversibilità di una trasformazione è tanto più grande quanto maggiore è lo squilibrio che in essa è stato provocato e, conseguentemente, quanto più rapida è la trasformazione;
- b) che, per contro, a trasformazioni più lente, dovute a squilibri più piccoli, corrispondono gradi d'irreversibilità minori: sì che, trasformazioni infinitamente lente dovute a squilibri infinitamente piccoli, cioè trasformazioni che avrebbero il carattere di "sequenze di quasi equilibri", dovrebbero risultare reversibili. L'osserva

zione che una trasformazione infinitamente lenta è solo quella che, di fatto, non avviene, conduce ad affermare che le trasformazioni reali, cioè capaci di avvenire realmente, sono tutte e sempre irreversibili.

Il ragionamento ora esposto, rigorosamente applicabile soltanto ai fatti energetici, può essere esteso per analogia anche ai fenomeni di deterioramento dei materiali, usando peraltro la prudenza richiesta per questo tipo di procedimento.

Infatti se si attribuisce all'"oggetto-opera d'arte" il carattere di "sistema" e quello di "mezzo" all'ambiente in cui l'oggetto è conservato, può essere sostenuto che ogni processo di deterioramento, prodotto da cause diverse di natura fisica, chimica o biologica, agenti indipendentemente o per sovrapposizione, almeno all'inizio è determinato da cause di ordine fisico praticamente in ogni caso riconducibili a trasformazioni di tipo termodinamico. Si può anche sostenere che le trasformazioni più frequenti, e le più importanti come entità delle conseguenze, sono rappresentate da trasferimenti di calore dal sistema al mezzo (o viceversa), sovente accompagnati da trasferimento di massa d'acqua in fase liquida o di vapore. Per contro i trasferimenti d'acqua, che possono dar luogo al successivo manifestarsi di altri fenomeni fisici oppure d'ordine chimico o biologico, non si manifestano spontaneamente fin che mancano i fatti termici capaci di determinarli (differenze di temperatura tra sistema e mezzo con o senza conseguenti trasferimenti di calore, oppure trasferimenti di altre forme d'energia).

Il modello termodinamico suggerito appare in sostanza di applicabilità sufficientemente generale (non sono ad esso immediatamente riconducibili solo pochi processi di importanza in genere non rilevante: quali ad esempio quelli in cui la causa del deperimento è da ricercare in fenomeni puramente meccanici, oppure elettrici, oppure di scambio d'energia radiante).

Esso è anche capace di rendere agevole l'interpretazione dei fenomeni nel loro aspetto globale e di facilitare la comprensione dei meccanismi d'evoluzione; ma non è atto, ovviamente, a fornire metodi o indicazioni generali per arrivare a valutazioni quantitative delle conseguenze dei fenomeni studiati in termini di entità del deterioramento. Un approfondimento maggiore in questo senso è forse ancora pos-

sibile facendo ricorso, con l'accortezza e la prudenza necessarie, alla ancora modesta raccolta di conoscenze sperimentali correttamente catalogate e criticamente analizzate di cui solo da qualche tempo si comincia a disporre.

Per rendere più agevole l'utilizzazione di queste conoscenze è utile far ricorso alla consueta classificazione delle cause di deterioramento nelle tre grandi categorie delle cause fisiche, chimiche, biologiche: in relazione alla natura dei fenomeni che, di volta in volta, sembrano acquistare importanza prevalente o determinante nell'avvio e nell'evoluzione dell'evento di deterioramento.

Questa schematizzazione è comunque utile anche per mettere in migliore evidenza, attraverso l'esame ordinato e successivo delle tre categorie di cause, il modo in cui queste intervengono in funzione l'una dell'altra: nonché il modo secondo cui sviluppano la propria azione in relazione alla natura dell'oggetto-opera d'arte (cioè alle proprietà del sistema), e infine il modo secondo cui tali cause possono essere associate alle caratteristiche e proprietà dell'ambiente di conservazione (cioè alle proprietà del mezzo).

2 PRINCIPALI CAUSE DEL DETERIORAMENTO DELLE OPERE D'ARTE

A miglior chiarimento delle considerazioni finali del precedente paragrafo sembra utile ripetere una elencazione delle principali cause di deperimento, sempre interpretabili come cause di squilibrio tra sistema e mezzo, classificandole nelle tre grandi categorie sopradette, allo scopo di poter mostrare, attraverso una esemplificazione tutt'altro che completa ma già abbastanza ricca per poter apparire significativa e convincente, le correlazioni tra le varie cause, l'influenza almeno all'inizio determinante di quelle di ordine fisico, l'importanza delle proprietà dell'ambiente.

2 1 Cause fisiche di squilibrio

Come si è già rilevato, possono essere ricondotte a fatti: puramente meccanici, prevalentemente termici, termici accompagnati da movimenti d'acqua, connessi ad assor-

bimenti d'energia raggiante, di carattere elettrico.

Le cause di carattere meccanico possono essere di tipo accidentale: sono ovviamente le più svariate e, per la loro natura, non riferibili a fatti inquadrabili in schemi razionali. Indubbiamente la probabilità di elevati affollamenti, la presenza di molti animali (i famigerati colombi torraioli) aumentano la probabilità di danni da azioni meccaniche accidentali. Esistono poi, anche se non molto numerose, alcune cause meccaniche razionalmente riconducibili a condizioni specifiche caratteristiche dell'ambiente: sono quelle dipendenti da azioni del moto dell'aria (interviene con azione diretta di erosione eolica o indiretta di attivazione di altri fatti fisici e chimici esaltati dall'incremento di scambi di calore per convezione e per evaporazione), da vibrazioni indotte che si propagano per via solida (traffico stradale o ferroviario, funzionamento di macchine fisse), oppure per via aerea (ancora le sorgenti di vibrazioni prima citate e, in più, quelle dovute al traffico aereo e ad altre sorgenti di sollecitazioni intense acustiche e subacustiche).

Le cause termiche, con effetti manifestantisi immediatamente con trasferimenti di calore, cambiamenti di fase, trasferimenti d'acqua, sono ricollegabili a fatti e proprietà dell'ambiente (del mezzo), quali sono le caratteristiche climatiche e meteorologiche del luogo, la presenza, accertata o presumibile di sorgenti di calore e di umidità, la presenza di acqua in fase liquida o di vapore o addirittura solida.

Deperimenti attribuibili ad assorbimento di energia raggiante sono nel maggior numero dei casi quelli dovuti all'irraggiamento solare. Non mancano tuttavia esempi di azioni prodotte da altre sorgenti quali le sorgenti di luce artificiale. L'effetto dell'assorbimento di energia raggiante può essere di carattere puramente termico oppure legato alla natura e alle proprietà dell'energia assorbita: a questo ultimo riguardo è lecito ritenere generalmente più pericolose le radiazioni di lunghezza d'onda minore.

Non si ha notizia di ricerche nei riguardi di squilibri provocati da cause elettriche macroscopiche né di accertamenti di danni attribuibili a queste cause. Si deve tuttavia ritenere che manufatti metallici possano essere gravemente danneggiati da corrosioni provocate ad esempio da cor-

renti disperse di varia origine (linee tramviarie e ferroviarie, centrali elettriche di trasformazione, grosse utenze elettriche in genere). Inoltre le scariche elettriche atmosferiche possono risultare gravemente dannose per qualunque tipo di opera d'arte, indipendentemente dalla natura del materiale di cui essa è composta.

2 2 Cause chimiche di squilibrio.

Sono quasi sempre da attribuire ad azioni di composti che, trasportati dall'aria (e forse anche dalle acque, ma ciò è ritenuto meno probabile o meglio assai meno frequenti), reagiscono con le materie che costituiscono l'opera d'arte. Questi composti, che seguendo l'uso corrente si indicano genericamente come inquinanti dell'aria e delle acque, vengono spesso distinti in naturali e artificiali: riservando questo secondo aggettivo qualificativo ai composti prodotti da azioni dell'uomo indipendenti da condizioni fisiche ambientali o da eventi di origine biologica.

Nel primo gruppo, degli inquinanti naturali, debbono comprendersi l'ossigeno e l'acqua in fase liquida e di vapore, l'anidride carbonica, l'acido solforico, gli aerosoli naturali.

Nel secondo gruppo vanno inclusi tutti i prodotti di processi attivati dall'uomo e in particolare dei processi di combustione, per i quali è stata fondatamente accertata la pericolosità per la stabilità delle opere d'arte: tra questi si ricordano l'anidride solforosa, l'anidride carbonica, l'ammoniaca e, con un grado di pericolosità molto più modesto o non ancora sicuramente rilevato, l'ossido di carbonio, gli ossidi di azoto, l'ozono.

Come gruppo a parte potrebbero poi essere considerate le polveri, di origine naturale o artificiale, alle quali deve forse essere attribuita qualche attitudine ad azioni di carattere chimico oltre a quella, più vistosa ma in genere meno pericolosa, della formazione di depositi.

Come è stato già rilevato, le azioni d'attacco di origine chimica sono marcatamente influenzate dalle condizio-

ni termiche e igrometriche: in genere l'acqua opera come veicolo per il trasferimento dell'inquinante dall'atmosfera alla superficie dell'oggetto.

2 3 Cause biologiche di squilibrio.

Vengono comprese in questa categoria tutte le cause di deperimento che si manifestano in conseguenza della instaurazione e dello sviluppo di colonie di microrganismi (muffe, funghi, batteri), nonché attraverso l'azione di organismi d'ordine superiore che può manifestarsi sotto forma di infestazioni da varie forme di vegetazione, di infestazioni da insetti, di azioni di grandi animali (come i colombi torraioni), e dello stesso uomo.

Sembra opportuno, in questa sede, limitarsi a dar qualche cenno d'informazione intorno alle cause biologiche più subdole e meno conosciute, rappresentate dallo sviluppo di microrganismi che con il proprio ciclo vitale interferiscono con i materiali dell'oggetto-opera d'arte.

L'enorme varietà di classi e specie di microrganismi che occorrerebbe prendere in considerazione, unitamente alla elevata attitudine delle diverse specie a modificarsi in relazione alle proprietà dell'ambiente in cui s'insediano, dà ragione della ancora notevole incompletezza delle conoscenze possedute nei riguardi della complessa fenomenologia connessa con gli attacchi d'origine microbiologica. Dei quali può forse dirsi soltanto che, nel proprio evolversi, si dimostrano sensibilmente influenzati dalle condizioni fisiche ambientali, in particolare dalla temperatura e dall'umidità relativa dell'aria. E che le manifestazioni, spesso oltremodo vistose, non sempre sono il segno di fatti di deperimento permanente tanto gravi quanto l'apparenza potrebbe indurre a supporre.

3 CLASSIFICAZIONE DEI BENI CULTURALI

Come esempio del testo da redigere si sceglie un argomento rientrante tra quelli da trattarsi al § 3 2 dell'Indice Analitico (Classificazione secondo i materiali costitutivi).

3 1 Opere d'arte in materiale lapideo

Le principali cause di deterioramento di un materiale lapideo sono dovute ai seguenti agenti:

- a) meccanici
- b) climatici e meteorologici
- c) biologici

3 1 1 Agenti meccanici

Gli agenti meccanici consistono essenzialmente in quella serie di cause, legate a movimenti o cedimenti della base naturale di appoggio del manufatto lapideo, che determinano l'insorgere di uno stato di tensione differente dal preesistente.

Tale nuovo stato di tensione può in alcuni punti superare le caratteristiche di resistenza del materiale generando distacchi e rotture.

3 1 2 Agenti meteoroclimatici

I principali agenti diretti e indiretti di deterioramento appartenenti alla categoria degli agenti climatici e meteorologici possono pensarsi costituiti essenzialmente da:

- Acqua
- Irraggiamento solare
- Inquinamento atmosferico
- Vento

Le differenti ipotesi che sono state presentate per tentare di spiegare le diverse cause di degradazione relative a questi agenti possono essere classificate in uno dei seguenti processi:

- a) fisico
- b) chimico
- c) biologico

Per ognuno dei suddetti processi è necessaria la presenza dell'umidità la quale assume pertanto a parametro fondamentale nei meccanismi di alterazione.

L'acqua può raggiungere la pietra dall'interno per capillarità, oppure dall'esterno in seguito alle precipitazioni atmosferiche o a fenomeni di condensazione.

Le azioni di attacco che l'acqua esercita su un materiale lapideo possono pensarsi suddivise in:

- attacco chimico in seguito a dilavamento;
- attacco chimico in seguito a condensazione;
- attacco fisico per dissoluzione;
- trattamento dei sali solubili in superficie mediante meccanismi di dissoluzione - evaporazione;
- dilatazioni dovute a processi di umidificazione-evaporazione;
- fenomeni di gelività.

L'attacco chimico in seguito a dilavamento viene a determinarsi in quanto la pioggia, soprattutto nei centri urbani e industrializzati, risulta fortemente acida (pH 4-6) a causa degli agenti inquinanti, presenti nell'atmosfera.

Tali agenti sono essenzialmente costituiti da anidride solforosa, anidride carbonica e ossidi di azoto gassosi (NO_x) mentre sono generalmente presenti in tracce gli acidi nitrico, cloridrico, solfidrico e solforico la cui azione è di minore importanza.

Si determina in tal modo una reazione chimica tra le sostanze che sono presenti come costituenti dell'atmosfera ed il materiale, soprattutto se questo è costituito principalmente da carbonato di calcio, ma il decadimento può avvenire anche nei materiali non calcarei tramite l'assorbimento dei prodotti della decomposizione del circostante materiale calcareo.

A causa della condensazione e della susseguente evaporazione si realizza un processo di spostamento dei sali solubili alla superficie con conseguente sfaldamento della crosta e comparsa di efflorescenze. Oltre a ciò i fenomeni di condensazione costituiscono un meccanismo di trasporto estremamente efficiente degli inquinanti atmosferici di tutti i tipi, visto che i veli liquidi formati da tale processo contengono in genere concentrazioni degli inquinanti maggiori che non la pioggia.

C'è pertanto da considerare che, mentre la pioggia rimuove immediatamente i prodotti risultanti dall'attacco del materiale originario, l'acqua di condensazione, non essendo normalmente sufficiente per scorrere sulla superficie, rievapora lasciando dietro di sé prodotti di reazione che possono dar luogo a ulteriori processi distruttivi.

Infine, per quel che riguarda l'attacco chimico dei materiali lapidei dovuto agli agenti inquinanti presenti nell'atmosfera, relativamente alla SO_2 , bisogna considerare un ulteriore meccanismo di trasporto consistente nell'assorbimento diretto della SO_2 da parte dei materiali in questione. L'anidride solforosa assorbita, tramite un processo di ossidazione favorito da condizioni di umidità relativa elevata, si trasforma in acido solforico e successivamente attacca la pietra formando solfato di calcio.

In assenza di fenomeni di condensazione o di dilavamento dovuto alla pioggia, l'assorbimento di anidride solforosa probabilmente non raggiungerebbe valori globalmente molto elevati a causa della saturazione delle superfici esposte, ma a causa della condensazione-evaporazione, vengono a determinarsi fasi di cristallizzazione dei solfati con conseguente frattura mentre, a causa della pioggia, i sali suddetti vengono sciolti e dilavati.

Il fenomeno del dilavamento di un materiale lapideo a causa del ruscellamento dell'acqua piovana è però ben più generale del caso particolare suesposto.

Recenti ricerche che si stanno conducendo attualmente in Francia stanno infatti dimostrando come il fenomeno del dilavamento sia importante a carico di numerosi sali solubili tipo solfati, nitrati e cloruri che possono essere presenti sulla pietra come costituenti o come prodotti di reazione di azioni di deterioramento. Questo provoca il danneggiamento diretto del materiale lapideo o indiretto, visto che vengono rimossi prodotti di reazione che potrebbero in un certo senso passivare la superficie esposta.

La dinamica di tale fenomeno di dissoluzione dipende dalla quantità totale di acqua di dilavamento e, a parità di questa quantità, dal tempo di dilavamento.

In particolare si nota che la quantità di sali disciolti aumenta, nel tempo, fino a raggiungere un massimo per poi decrescere fino ad annullarsi secondo un andamento pressapoco parabolico e che tale massimo aumenta in valore assoluto all'aumentare della quantità di acqua e del tempo di dilavamento. I processi di bagnatura-prosciugamento, insieme agli effetti dell'irraggiamento solare che determina variazioni della temperatura e dei possibili cicli gelo-disgelo, causano dei processi di variazione dimensionale del materiale lapideo.

Tale variazione dimensionale, se contrastata, determina l'insorgenza di sollecitazioni che possono superare i limiti di resistenza del materiale causando così distacchi e rotture. Oltre a ciò, cicli di dilatazione-contrazione sottopongono il materiale a fatica con conseguente diminuzione delle caratteristiche meccaniche e variazione delle sue proprietà fisiche.

3 1 3 Agenti biologici

Gli organismi viventi contribuiscono al decadimento dei materiali lapidei, sebbene la loro azione sia leggermente meno incisiva rispetto alle altre sin qui esposte. Essi possono essere suddivisi in:

- Licheni e microfitoplancton
- Piante
- Batteri
- Animali acquatici
- Animali domestici

I licheni, organismi simbiotici di alghe e funghi, possono essere distinti in calcicoli e silicicoli a seconda del tipo di roccia preferito, ed in endolitici e esolitici a seconda che il tallo sia completamente nascosto nella pietra, oppure se penetra nella pietra solamente la radice. Essi esercitano sul materiale lapideo un attacco chimico dovuto alle loro secrezioni, ed un danneggiamento meccanico in seguito alla penetrazione delle loro radici ed alle variazioni di volume di queste al variare del loro contenuto di umidità.

Oltre ai licheni, esercita azione di attacco chimico e fisico sui materiali lapidei tutta una serie di microrganismi chemiolitotropici (alghe, muffe, funghi).

In aggiunta a questi, diversi tipi di piante (erbe, edera, etc.) possono infestare un materiale lapideo dando luogo a fenomeni di deperimento analoghi a quelli causati dai licheni.

Per quel che riguarda i batteri si può dire che lo stato delle conoscenze a tutt'oggi è ancora in fase di ipotesi.

Essendo collegata ad ogni situazione di deterioramento la presenza di nitrati, solfati e sali complessi di ferro, si è supposto che i batteri del ciclo dell'azoto, dello zolfo e del ferro possano partecipare a tale processo.

I batteri del ciclo dell'azoto possono suddividersi in:

- a) batteri che convertono in ammoniaca materiale organico azotato;

- b) batteri che fissano l'azoto atmosferico convertendolo in ammoniaca;
- c) batteri che ossidano l'ammoniaca per formare acido nitroso e nitrico.

L'ossidazione del materiale azotato e dell'ammoniaca costituiscono processi esotermici, mentre la fissazione dell'azoto atmosferico avviene tramite un processo endotermico la cui richiesta di energia può essere fornita da processi ossidativi a carico di materiale organico.

La crescita è infine favorita da un ambiente pressappoco neutro, condizione facilmente realizzabile sulla maggioranza dei materiali lapidei, visto che i prodotti acidi del loro metabolismo possono essere neutralizzati dai carbonati presenti nelle pietre.

I batteri del ciclo dello zolfo possono sia ridurre solfiti e solfati a solfuri sia ossidare i solfuri e lo zolfo ad acido solforico; da qui l'ipotesi che i batteri provocherebbero la fissazione dello zolfo atmosferico sulle pietre causando in tal modo i processi di deterioramento accompagnati dalla comparsa di solfati.

Lo zolfo si trova nell'atmosfera sia sotto forma di composti gassosi (H_2S , SO_2) che liquidi (H_2SO_4) e solidi [$CaSO_4$, $2H_2O$, $(NH_4)_2SO_4$]. Oltre a ciò può trovarsi sotto forma di zolfo organico, o di combinazioni di zolfo e azoto.

Le concentrazioni dei componenti suddetti sono fortemente influenzate dal grado di inquinamento globale esistente nella zona.

Ulteriore agente biologico di deterioramento vengono infine considerati alcuni animali superiori quali i molluschi acquatici ed i piccioni.

Il meccanismo di alterazione è in tal caso di natura chimica, in dipendenza dei prodotti del metabolismo di questi animali, e di natura meccanica in dipendenza delle loro attività vitali.

3 1 4 Effetti del deterioramento

Gli effetti del deterioramento osservati sono assai vari e vanno ad interessare contemporaneamente tutte le proprietà fisiche e chimiche del materiale lapideo. Per comodità le alterazioni verranno qui suddivise in:

- 1 - Alterazioni superficiali
- 2 - Alterazioni interne

3 1 4 1 Alterazioni superficiali

Le alterazioni superficiali possono pensarsi costituite da:

a) Infestazioni di origine biologica

Tutti gli agenti biologici citati precedentemente possono essere presenti sulle pietre dando luogo a formazioni tipiche per ogni specie.

Pure presenti sono i prodotti del loro metabolismo o i loro resti, tipici anche questi di ogni agente.

b) Patine

Si tratta di pellicole sottili di materiale alterato aderente al corpo sottostante e di colore variabile dal verde, al grigio, al nero.

Esse contengono in genere solfati, sali complessi di ferro, polveri naturali e residui metabolici. Sono generalmente attribuite all'azione dei microrganismi chemiolitotropici sia di origine animale che vegetale.

In atmosfere urbane inquinate sono generalmente di colore scuro a causa delle sostanze carboniose depositate dall'aria.

c) Striature

Sono costituite da solchi orizzontali o inclinati lungo le zone di minor resistenza del cemento naturale che collega i grani. Si può osservare questa forma di alterazione in un materiale sottoposto ad una azione eolica o ad una ele

vata umidità interna.

d) Croste

La formazione di croste è dovuta essenzialmente ai meccanismi di trasporto dell'acqua.

Questa può penetrare nella pietra in modi diversi (pioggia, assorbimento da vento umido, condensazione, umidità ascensionale). Penetrata in profondità essa opera azione di dissoluzione dei sali solubili costituenti il materiale che poi, evaporando, deposita concentrati.

Se l'evaporazione dell'acqua ed il conseguente deposito di sali avvengono in superficie si ha formazione di croste esterne o di efflorescenze in dipendenza della natura dei sali, se tale deposito avviene all'interno della pietra si ha formazione di croste interne.

Le croste esterne permangono sul materiale e vengono dilavate a seconda della quantità di acqua che raggiunge la superficie e della solubilità dei sali costituenti. Si forma ad esempio una crosta resistente se i sali che migrano sono costituiti da gesso e da carbonato di calcio e magnesio.

Tali croste sono costituite, oltre che dalle sostanze disciolte nella pietra madre, anche dalle sostanze depositatevisi dalla atmosfera. In dipendenza di ciò assumono colore bianco o grigiastro in atmosfera poco inquinata mentre assumono colorazioni più scure in aree urbane o industrializzate, a causa dei depositi di sostanze carboniose dall'atmosfera inquinata.

La forma di queste croste dipende dalla natura della pietra e soprattutto dalla sua porosità.

I pori larghi, che offrono un facile passaggio all'acqua della pioggia, danno luogo a delle croste concrezionate a superficie frastagliata. Se i pori sono piccoli e uniformemente distribuiti, le croste sono più lisce.

Se il deposito di sali avviene all'interno, la zona interessata subisce un anormale incremento della durezza in dipendenza del fatto che i pori piccoli sono otturati dal sale, mentre i grandi sono parzialmente ostruiti dalle cristallizzazioni saline sulle loro pareti. La zona vicina, al contrario, si

indebolisce a causa della dissoluzione dei sali che modifica progressivamente la stabilità degli aggregati minerali.

Si viene in tal modo a formare un secondo strato le cui proprietà sono profondamente mutate rispetto alla situazione precedente. In generale questo si presenta sabbioso, senza coesione e spesso saturo di sali solubili.

Vengono così a formarsi le seguenti zone caratteristiche:

- 1) una crosta esterna molto sottile e di colore scuro;
- 2) uno strato molto duro, il cui colore va dal bianco al grigio;
- 3) una zona tenera, giallastra, facilmente polverizzabile, di consistenza sabbiosa;
- 4) la pietra inalterata.

La zona sabbiosa ha una grande importanza perchè permette alla crosta di staccarsi in pezzi più o meno grandi sotto l'azione dei seguenti agenti:

- 1) Gelo
il quale crea delle tensioni in seguito a variazioni di volume.
- 2) Irraggiamento solare
il quale genera delle tensioni in seguito a variazioni delle dimensioni lineari.
- 3) Pressione osmotica
- 4) Cristallizzazione dei sali
la quale genera variazioni di volume e quindi tensioni.
- 5) Gravità
la quale permette alla crosta di staccarsi dallo strato sabbioso sottostante.

e) Polverizzazione

L'effetto del deperimento più importante e caratteristico, dopo la formazione delle croste, è costituito dalla polverizzazione del materiale lapideo. La zona superficiale, fino ad una profondità di alcuni centimetri, si trasforma in una massa sabbiosa, priva di consistenza, che si stacca facilmente.

Generalmente questa alterazione è di tipo preferenziale, nel senso che si localizza in solchi disposti lungo i piani di giacitura di cava. La profondità di questi solchi varia e traccia sulla superficie una serie di rilievi.

Questi assumono spesso la forma di una grigliatura, costituita dall'intersecarsi dei solchi.

Gli agenti più tipici di questo tipo di degradamento sono il vento, il gelo ed i sali solubili.

In particolare i sali meno solubili si concentrano sui rilievi dei grani e sugli elementi leganti mentre i sali più solubili si trovano nella zona che formerà in seguito il solco disposto lungo la giacitura di cava. L'incrocio di queste due zone determina il reticolo.

f) Corrosioni alveolari

Tale tipo di corrosione si presenta sotto forma di cavità di dimensioni variabili, dal contorno più o meno circolare, diffuse casualmente sulla superficie della pietra e si pensa sia dovuta ad un particolare meccanismo di deterioramento detto "malattia alveolare".

Questa forma di deterioramento è dovuta all'azione di sali molto solubili, e igroscopici, capaci quindi di scambiare rapidamente e frequentemente il vapor d'acqua con l'aria.

La dinamica del fenomeno è fortemente influenzata da fenomeni di turbolenza localizzata. Il vento agisce infatti da vettore di calore e di umidità facendo aumentare la frequenza dei passaggi attraverso la curva di equilibrio di idratazione dei sali.

Il predetto aspetto caratteristico di corrosione casualmente disposta sulla superficie della pietra, è tipico di materiali fortemente disomogenei che presentano zone a porosimetria fortemente differenziata.

La porosità del materiale influenza la capacità di dissoluzione dei sali da parte del dilavamento dovuto all'acqua piovana.

Detto infatti t_r il tempo di inizio del ruscellamento su una pietra sottoposta alla pioggia, si vede sperimentalmente che la quantità di acqua cresce dopo t_r mentre contemporaneamente diminuisce il tenore in sali dell'acqua di dilavamento. Per questa ragione i sali molto solubili non saranno mai espulsi dalle zone molto porose di una pietra poiché il ruscellamento inizierà allorché questi sali saranno totalmente disciolti e riassorbiti dalla pietra.

E' in corrispondenza di tali zone che tende a localizzarsi la corrosione alveolare.

Non appena la cristallizzazione o l'idratazione dei sali determinano una cavità sulla superficie, in corrispondenza di questa cavità viene a determinarsi una zona turbolenta a causa della disuniformità del campo aerodinamico creato dal vento sulla superficie della pietra.

La turbolenza, come detto, esalta a sua volta la dinamica del fenomeno disgregativo.

g) Concrezioni sotto forma di stalattiti

Queste sono dovute all'attacco chimico della pioggia sulla pietra. In particolare, a causa dell'acidità della pioggia, vengono disciolti solfati e carbonati.

Questa soluzione, percolando all'interno ed all'esterno della pietra, rievapora successivamente depositando i sali disciolti sotto forma di concrezioni.

3 1 4 2 Alterazioni interne

Le alterazioni interne possono pensarsi costituite da:

a) Alterazioni interne non visibili

Queste non appaiono sulla superficie della pietra e la decoesione completa si produce all'interno ad una profondità di qualche centimetro. In tale zona la pietra è pulverulenta e totalmente disaggregata. Questo tipo di alterazione è il più frequente ed è difficilmente individuabile all'inizio visto che lo strato superficiale si mantiene coerente.

Essa tende a localizzarsi:

- 1) in corrispondenza delle zone limite di risalita dell'acqua di imbibizione;
- 2) in corrispondenza dei cornicioni e di ogni altro oggetto tipo davanzali, balconate, etc.

In coincidenza di stati avanzati di deterioramento, la spessa crosta di pietra si stacca lasciando al suo posto una cavità dalla superficie pulverulenta.

b) Alterazioni interne visibili

Questo tipo di alterazione inizia in corrispondenza degli spigoli e si dirige verso il centro del blocco di pietra, che sembra gonfiarsi e fessurarsi. Esso può interessare il monumento a qualsiasi altezza e colpire tutte le pietre o solamente alcune di esse.

Il materiale appare fortemente disgregato presentando ovunque preoccupanti stati di alterazione.

Sembra che le cause siano soprattutto da attribuirsi alla natura della pietra, più che alla sua collocazione nella costruzione. Solamente in qualche caso si tratta di pietre mal lavorate o poste in opera di taglio rispetto ai piani di giacitura, oppure il fenomeno può dipendere dalla presenza di vene tenere di argilla o dall'azione del gelo. Non sembra invece determinante alcuna azione chimica in questo tipo di alterazione.

INDICE ANALITICO

1 CONTENUTO DI INFORMAZIONE DI UN CAMPO D'ONDE LUMINOSO1 1 Luce Coerente

- 1 1 1 Descrizione scalare del campo.
- 1 1 2 Coerenza spaziale e temporale.
- 1 1 3 Diffusione e diffrazione da ostacoli.
- 1 1 4 Campionamento e quantizzazione del campo.

1 2 Luce Incoerente

- 1 2 1 Campo emesso da sorgenti termiche.
- 1 2 2 Coerenza parziale.
- 1 2 3 Propagazione delle funzioni di correlazione.
- 1 2 4 Formazione di immagini.

1 3 Colore

- 1 3 1 Combinazione additiva dei colori.
- 1 3 2 Diagrammi cromatici.
- 1 3 3 Funzioni di distribuzione.
- 1 3 4 Combinazione sottrattiva dei colori.

1 4 Polarizzazione

- 1 4 1 Stato di polarizzazione di un'onda luminosa.
- 1 4 2 Isotropia e anisotropia ottica.
- 1 4 3 Polarizzatori ed analizzatori.
- 1 4 4 Modifica dello stato di polarizzazione per interazione con ostacoli.

2 RIVELATORI DI RADIAZIONE VISIBILE

- 2 1 Emulsioni fotografiche bianco e nero
- 2 2 Emulsioni fotografiche a colori
- 2 3 Gelatine al bicromato
- 2 4 Materiali termoplastici
- 2 5 Materiali ferroelettrici
- 2 6 Rivelatori fotoelettrici
- 2 7 Rivelatori piroelettrici
- 2 8 Dispositivi ad accoppiamento di carica

3 METODI DI RILEVAMENTO, STUDIO E DOCUMENTAZIONE3 1 Fotogrammetria

- 3 1 1 Principi di fotogrammetria.
- 3 1 2 Camere metriche, raddrizzatori e restitutori.
- 3 1 3 Apparecchiature per rilievi architettonici.
- 3 1 4 Fotogrammetria analitica

3 2 Olografia e Trattamento Ottico dell'Informazione

- 3 2 1 Principi di olografia.
- 3 2 2 Interferometria olografica.
- 3 2 3 Lasers per olografia.
- 3 2 4 Trasformazione ottica di Fourier e applicazioni

3 3 Colorimetria

- 3 3 1 Principi di misurazione del colore.
- 3 3 2 Spettrofotometri e colorimetri.
- 3 3 3 Colorimetri fotoelettrici
- 3 3 4 Colorimetri a scansione.

3 4 Fotoelasticimetria

- 3 4 1 Fotoelasticità.
- 3 4 2 Tecnica del congelamento degli sforzi.
- 3 4 3 Rivestimenti fotoelastici.
- 3 4 4 Altre tecniche ottiche di controllo non distruttivo.

BIBLIOGRAFIASINTESI DEI PRINCIPALI CONTENUTI1 CONTENUTO DI INFORMAZIONE DI UN CAMPO D'ONDE LUMINOSE

Al fine di mettere in evidenza le grandezze fisiche basilari che intervengono nei metodi ottici, ci sembra opportuno premettere qualche breve richiamo sul contenuto di informazione di un campo d'onde luminoso.

1 1 Luce coerente

Cominciamo dal caso più semplice che è quello di una radiazione coerente dal punto di vista temporale e spaziale. Con tale locuzione si intende dire che la funzione di correlazione del campo (valor medio del prodotto dei valori del campo in due punti-istanti differenti) si mantiene sensibilmente diversa da zero su tempi molto lunghi (al limite infinitamente lunghi) e su distanze (contate trasversalmente alla direzione di propagazione) molto grandi (al limite su tutta l'estensione trasversale). In pratica tale tipo di radiazione può essere bene approssimata da quella emergente da un laser. Supporremo che tale radiazione sia descrivibile in termini scalari.

Supponiamo che con un fascio di raggi di radiazione del tipo detto venga illuminato un oggetto qualsiasi. Il caso più comune è quello in cui l'oggetto è diffondente. Ogni suo punto, illuminato, riemette la radiazione su un grosso angolo solido, con un'intensità che può variare da punto a punto. Fissato un qualunque piano attraversato dalla radiazione diffusa (cioè un piano attraverso il quale si veda l'oggetto illuminato), la distribuzione di campo su tale piano è univocamente legata alla posizione e alle proprietà di diffusione di ogni punto dell'oggetto. Il campo in ogni punto del piano è individuato da due numeri reali, l'ampiezza e la fase iniziale. L'informazione proveniente dall'oggetto può ricavarsi misurando il campo nei punti del piano detto. Essa ha quindi una struttura intrinsecamente bidimensionale (corrispondente alle due coordinate x, y che individuano i punti del piano). I rivelatori ottici sono insensibili alla fase ma è possibile tradurre le informazioni di fase in informazioni di ampiezza sfruttando i fenomeni di interferenza. E' questo il principio su cui si basa l'olografia.

Può forse sorprendere l'affermazione che l'informazione disponibile abbia struttura bidimensionale, dato che si usa

dire che un ologramma è in grado di fornire immagini tridimensionali degli oggetti. In realtà non vi è contraddizione. Basta riflettere sul fatto che ciò che l'ologramma è in grado di farci rivedere è la superficie dell'oggetto, cioè un ente che pur essendo tridimensionale rispetto alle familiari coordinate cartesiane x, y, z , rimane intrinsecamente bidimensionale (ogni punto sulla superficie potendo essere individuato da due opportune coordinate curvilinee).

Per comprendere l'importanza di questo tipo di struttura, si faccia il confronto fra il caso in discussione e quello dell'informazione portata da un segnale elettrico a sviluppo temporale. In quest'ultimo caso l'informazione ha una struttura unidimensionale (corrispondente all'unica variabile tempo). Già questo fa intuire i vantaggi (almeno potenziali) di un sistema di elaborazione ottica dell'informazione. Per fare un esempio molto semplice, si supponga di dover trasferire l'informazione contenuta in una data immagine (una fotografia) da una regione dello spazio ad un'altra. Ciò può farsi con un sistema televisivo e in questo caso si ricorre ad un meccanismo di scansione, cosicché le diverse linee in cui viene suddivisa l'immagine vengono trasmesse in intervalli di tempo diversi secondo uno schema sequenziale (o seriale). Ma può anche farsi utilizzando un opportuno sistema ottico (eventualmente impiegando un fascio di fibre ottiche) e in questo caso le linee dette prima vengono trasmesse secondo uno schema in parallelo (e, fra l'altro, alla velocità della luce).

Tornando alla distribuzione di campo sul piano attraversato dalla radiazione proveniente dall'oggetto, aggiungiamo qualche cosa circa il problema di quantificare l'informazione. La regione entro la quale si fanno le misure è sempre, ovviamente, di dimensioni finite. Entro tale regione le misure vengono eseguite solo in un numero finito di punti distinti in virtù del fatto che il campo non varia (nello spazio) sensibilmente se ci si sposta di una quantità inferiore ad un certo limite fissato dalle dimensioni massime dell'oggetto (teoria del campionamento). Infine, in ogni punto, il risultato delle misure viene espresso in forma quantizzata. Basta per questo suddividere l'intervallo fra i valori minimo e massimo che la grandezza da misurare può assumere (a priori) in tanti intervallini di estensione pari all'indeterminazione di misura. Questo procedimento complessivo (campionamento del campo e quantizzazione delle misure) di digitalizzazione dell'informazione rac-

colta, rappresenta fra l'altro la base per l'elaborazione elettronica delle immagini.

1 2 Luce incoerente

Al di fuori del laboratorio l'illuminazione degli oggetti è sistematicamente incoerente. Ciò è dovuto al fatto che le sorgenti ordinarie sono di tipo esteso (insieme di radiatori incorrelati) ed emettono su molte frequenze. Supponiamo dapprima che la radiazione emessa copra un intervallo di frequenze piccolo rispetto alla frequenza media (radiazione quasi-monocromatica). Analogamente a quanto fatto nel caso coerente, esaminiamo la radiazione su un piano attraverso il quale si veda l'oggetto. A causa dell'esistenza, entro la sorgente, di tanti radiatori incorrelati, in un qualunque punto del piano il campo diventa una variabile casuale. L'informazione sull'oggetto non va più ricercata direttamente nel campo ma nella sua funzione di correlazione spaziale. Quest'ultima (valore medio del prodotto dei valori del campo in due punti) dipende da quattro coordinate spaziali nel piano in esame (due coordinate per ciascun punto della coppia scelta). E' quanto dire che l'informazione in giuoco ha una struttura quadridimensionale. Per registrarla integralmente si dovrebbe misurare la funzione di correlazione per tutte le possibili coppie di punti del piano (sia pure attuando un opportuno processo di campionamento). Ciò, per quanto possibile in linea di principio, risulterebbe estremamente laborioso in pratica. (Vale però la pena di dire che tale procedimento viene attuato, per un limitato numero di coppie di punti, in radioastronomia). Inoltre, contrariamente a quanto succede nel caso coerente con l'olografia, non esiste un metodo di tipo ottico per ricostruire il campo diffuso dall'oggetto a partire dalle misure dette. E' questa la ragione per cui ancora oggi la registrazione dell'informazione si fa sfruttando il processo di formazione di immagini reali mediante lenti e registrando la distribuzione di intensità luminosa (fotografia e fotogrammetria). Questo processo di registrazione è però incompleto (l'intensità è solo un caso particolare della funzione di correlazione spaziale e cioè quello in cui i due punti della coppia coincidono) ed è per questo che per aumentare l'informazione raccolta si ricorre a più fotografie riprese da punti diversi (stereofotogrammetria).

Quando la radiazione non è quasi-monocromatica si può sempre pensare di rappresentarla come sovrapposizione di tanti contributi quasi-monocromatici per ognuno dei quali va ripetuto quanto detto prima. In termini correnti, si deve studiare come l'oggetto diffonde la radiazione, colore (spetttrale) per colore. Ciò porta ad aggiungere un ulteriore grado di libertà (dipendenza dalla lunghezza d'onda della radiazione usata) alla struttura dell'informazione. Dal punto di vista fisico, questa sarebbe l'unica considerazione di base che interessa. Tuttavia, per quanto riguarda questo aspetto dell'informazione sull'oggetto, non si può prescindere dal modo in cui l'occhio umano risponde ad una radiazione non monocromatica. Dobbiamo cioè tenere presenti alcuni risultati dello studio (a metà strada fra fisica e fisiologia) della visione del colore.

1.3 Colore

L'osservazione fondamentale nei riguardi della visione del colore è che l'occhio può rispondere alla stessa maniera (cioè dando la stessa sensazione di colore) a radiazioni di diversa composizione spettrale. Ciò ha condotto, per lungo tempo, a ricercare se la sensazione di colore corrispondente ad una qualunque distribuzione spettrale potesse essere ottenuta sovrapponendo, in proporzioni opportune, solo un numero finito di radiazioni base (colori fondamentali o primari).

Prendiamo due radiazioni monocromatiche, per es. una nel rosso e una nel verde. Sommiamo tali luci proiettandole simultaneamente su uno stesso schermo bianco. Variando l'intensità relativa di tali luci otterremo (ai fini della sensazione visiva) tutta una gamma di colori intermedi (giallo, arancione). Ora prendiamo una terza radiazione monocromatica che dia una sensazione di colore non compreso nella gamma prima detta, ad es. una radiazione nel bleu. Sommiamo questa terza luce alle prime due. Adesso, al variare dei pesi delle tre luci, otterremo una gamma di colori molto più vasta (compreso il bianco). Ognuno dei colori compresi in tale gamma può essere individuato mediante tre coefficienti.

Comunque si scelgano le tre luci base, esistono sempre dei colori che non possono essere ottenuti per addizione

dei tre di base. Per poter ottenere qualunque colore mediante i tre di base occorre ammettere che i tre coefficienti possano anche assumere valori negativi. Il significato pratico di ciò è il seguente. Supponiamo di avere un colore, diciamo un violetto, che non può essere uguagliato sommando, con coefficienti positivi, i tre colori di base, diciamo rosso verde e bleu. Se lasciamo nella miscela il rosso e il bleu soltanto e il verde, anziché aggiungerlo al rosso e al bleu, lo aggiungiamo al violetto, riusciremo a trovare delle proporzioni dei tre colori base tali che la miscela del violetto e del verde dia la stessa sensazione visiva del rosso e del bleu. Il coefficiente che esprime il peso del verde viene allora preso come negativo. In base ad una delle leggi fondamentali della colorimetria (l'uguaglianza fra due colori non viene alterata se ad entrambi si somma la stessa quantità di un qualunque altro colore), si ammette che il violetto sarebbe uguagliato dalla miscela di rosso e bleu se ad essa si potesse sottrarre il verde.

Con la precedente estensione qualunque colore visibile dall'occhio può essere ottenuto per combinazione di tre colori base. Qualsiasi terna di colore (purché nessuno dei tre sia combinazione degli altri due) può essere scelta a tale scopo, cosicché non esistono tre colori primari privilegiati in senso assoluto. Tuttavia scegliendo come primari tre colori che cadano nel rosso, nel verde e nel bleu si amplia al massimo la gamma dei colori ottenibili con coefficienti positivi. Si noti che, una volta fissata l'intensità totale della radiazione, i tre coefficienti non sono indipendenti. Quindi, se ci si riferisce ad un'intensità prefissata, è possibile individuare ogni colore mediante due soli coefficienti (positivi o negativi) e ciò permette di rappresentarlo mediante punti di un piano cartesiano. La regione occupata dai punti corrispondenti a tutti i colori visibili ha una forma grossolanamente triangolare (triangolo o diagramma cromatico). La forma precisa del diagramma cromatico dipende dalla scelta dei tre colori base. Il passaggio da una terna di colori base ad un'altra è equivalente ad un cambiamento degli assi di riferimento nel piano della rappresentazione e quindi i vari triangoli o diagrammi cromatici sono ricavabili l'uno dall'altro. In fig. 1 è disegnato uno di questi diagrammi riferito ai colori fondamentali rosso (R), verde (G) e bleu (B) (lunghezze d'onda di 0.7, 0.5461 e 0.4358 micron). La linea convessa contrassegnata come "spectrum locus" rappresenta l'insieme dei colori spettra-

li (i numeri lungo la curva danno le lunghezze d'onda). I punti interni al segmento che congiunge due generici punti della curva "spectrum locus" rappresentano tutti i colori che possono ottenersi combinando in tutte le possibili proporzioni (con coefficienti positivi) i due colori spettrali agli estremi. E' proprio la convessità della curva che mostra come non sia possibile trovare tre colori in grado di dare tutti gli altri per combinazione a coefficienti positivi. In teoria si può però fare riferimento a degli ipotetici colori (in realtà inesistenti) quali quelli contrassegnati con (X), (Y), (Z) in fig. 1, tali che il triangolo XYZ comprenda al suo interno tutti i punti rappresentativi di colori visibili. Se si ridisegna il diagramma cromatico, prendendo come assi coordinati (ortogonali) gli assi ZX e ZY, si ottiene il diagramma di fig. 2. Tutti i colori hanno ora coefficienti positivi. La scelta, a prima vista sorprendente, di tre colori di riferimento che in realtà non esistono, presenta diversi vantaggi. Quello più rilevante, dal punto di vista delle misure, è costituito dal seguente risultato. Se di una radiazione si conosce la distribuzione spettrale, per ottenere i suoi coefficienti nel sistema XYZ basta moltiplicare la stessa volta a volta per ciascuna di tre funzioni (dette di distribuzione) e integrare il risultato su tutto lo spettro. La caratteristica importante di tali funzioni, riportate in fig. 3, è di essere sempre positive. Ciò permette di simulare tali funzioni con opportuni filtri quando si debba realizzare un colorimetro.

Richiamiamo infine alcuni termini della nomenclatura usata in colorimetria. I colori corrispondenti al perimetro del diagramma cromatico vengono detti saturi. In particolare si chiamano porpore saturi i colori (non contenuti nello spettro) che stanno sulla retta congiungente il rosso estremo (0.7 micron) col violetto estremo (0.4 micron). Il punto E di fig. 2 individua il cosiddetto bianco E (distribuzione spettrale piatta rispetto alla lunghezza d'onda). I punti S_A , S_B , S_C corrispondono alla luce (sempre di tipo bianco) emessa da sorgenti opportunamente definite e rappresentative della luce emessa dalle lampade da incandescenza (A), della luce solare media (B) e di quella solare diffusa dal cielo (C). Si dicono complementari i colori spettrali la congiungente dei quali passa per il punto E, cioè che addizionati in proporzioni opportune danno il bianco. Si vede dal diagramma che tutta una regione di colori spettrali (quella del verde) ha come complementari le

fig. 1

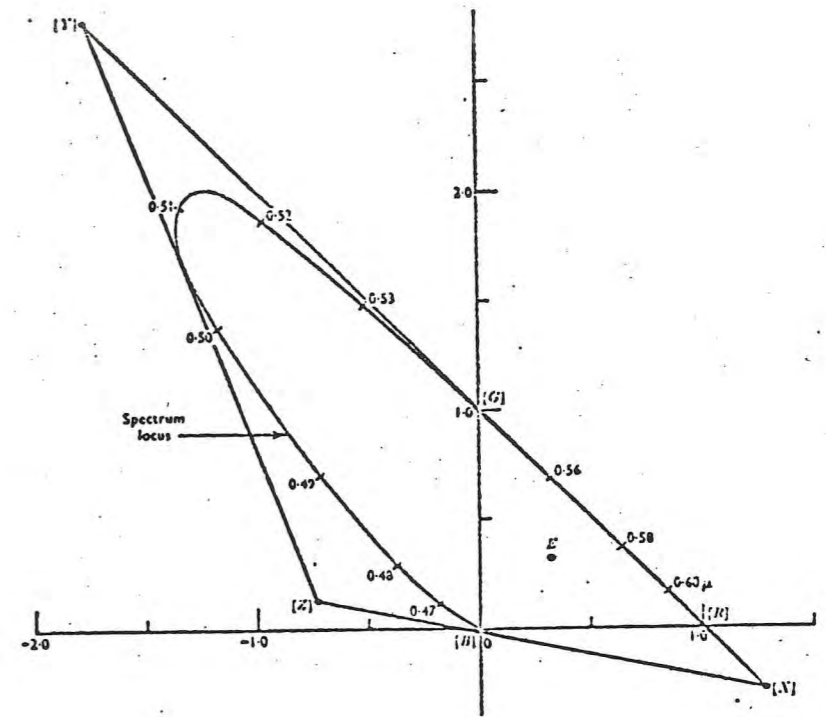


fig. 2

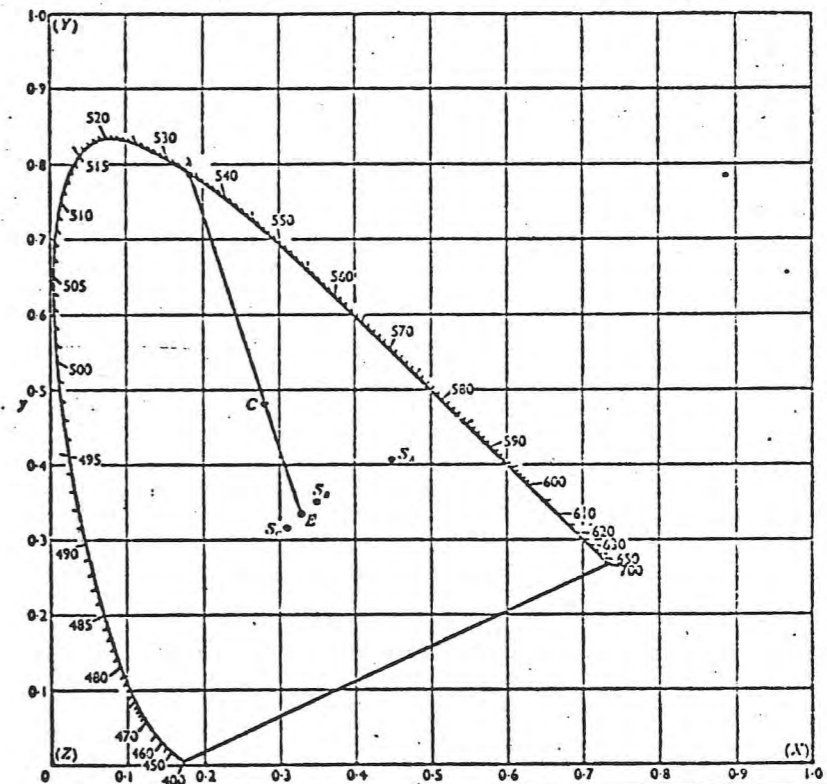
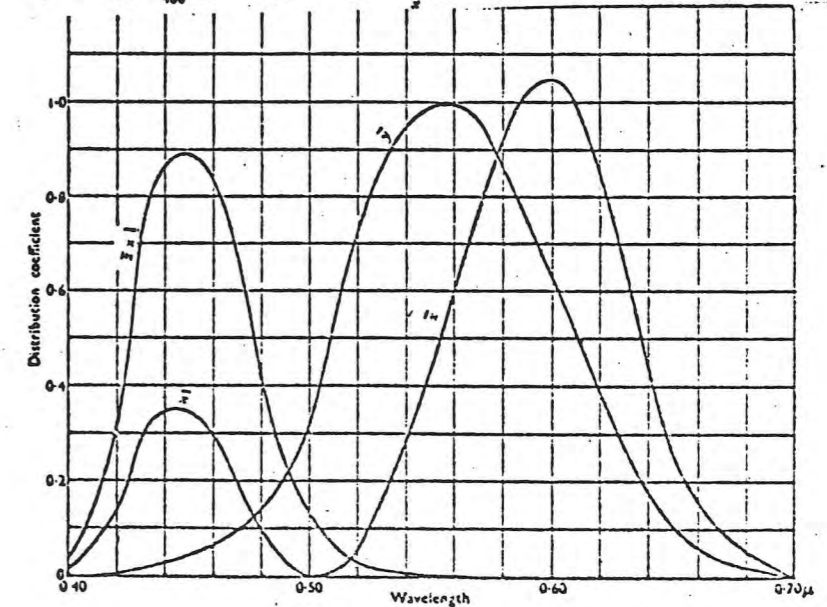


fig. 3



porpore sature. Tutti i colori interni al diagramma cromatico, come quello rappresentato da C in fig. 2, si dicono non saturi. Essi possono pensarsi come somma del bianco E e di un colore spettrale (o di una porpora satura) individuato dalla intersezione della semiretta da E a C con il perimetro del diagramma (in fig. 2). Si chiama allora lunghezza d'onda dominante quella del colore spettrale che va aggiunto al bianco E per avere C (nel caso la semiretta da E a C tagli il diagramma dalla parte delle porpore sature, si prende come dominante la lunghezza d'onda del verde complementare dalla porpora in giuoco dandogli segno negativo). Si chiama poi fattore di purezza o grado di saturazione del colore C il numero (compreso fra zero e uno) che esprime: la percentuale di colore spettrale nella miscela (di tale colore e di bianco E) che dà il colore C.

1 4 Polarizzazione

Abbiamo sinora fatto riferimento ad una trattazione scalare del campo elettromagnetico, prescindendo cioè dal suo aspetto vettoriale. Le caratteristiche di evoluzione del campo (ad es. elettrico) dell'onda possono peraltro convogliare una certa quantità di informazione sull'oggetto, cosicché è opportuno richiamare brevemente alcune nozioni su tale argomento.

La radiazione luminosa emessa da una sorgente ordinaria (luce naturale) è, come suol dirsi, non polarizzata. Si intende dire con ciò che, in ogni punto dello spazio investito dalla radiazione, il campo elettrico dell'onda, al passare del tempo, cambia direzione in maniera casuale. Si può facilmente trasformare questa radiazione in una polarizzata linearmente, nella quale cioè il campo elettrico mantiene sempre la stessa direzione al passare del tempo. E' sufficiente sfruttare la proprietà di certi materiali anisotropi di assorbire la radiazione quando il suo campo elettrico ha una certa direzione e di non assorbirla se in direzione ortogonale (polarizzatori). L'esempio più familiare di tali materiali è il polaroid. Inviando luce naturale attraverso un materiale di questo tipo, viene lasciata passare la sola componente del campo elettrico nella direzione di trasparenza del polarizzatore e la radiazione emergente è polarizzata linearmente. Alternativamente si può usare la radiazione emessa da un laser (che è

quasi sempre polarizzata linearmente). Da radiazione polarizzata linearmente può ottenersi facilmente radiazione con polarizzazione di altro tipo, ad es. ellittica. In questo caso il campo dell'onda, pur non mantenendo sempre la stessa direzione, ha un comportamento temporale di tipo regolare (ad es. l'estremo libero del vettore campo elettrico si muove su un'ellisse al passare del tempo). Queste trasformazioni dello stato di polarizzazione possono ottenersi sfruttando opportunamente altri materiali anisotropi.

Ciò che importa rilevare ai nostri fini è che lo stato di polarizzazione (ad es. lineare) di un'onda può essere modificato dall'interazione dell'onda con gli oggetti che si vogliono studiare. Ad es. se l'onda attraversa un materiale birifrangente (che presenta un indice di rifrazione diverso a seconda della direzione di vibrazione del campo), all'uscita, in genere, la sua polarizzazione non sarà più lineare e dal suo esame si otterranno informazioni sul materiale. Proprio su tale possibilità riposa la tecnica della fotoelasticimetria nella quale la birifrangenza è indotta da sforzi meccanici.

Anche nel processo di diffusione della radiazione da parte di un oggetto si hanno, generalmente, fenomeni di cambiamento dello stato di polarizzazione e anche ciò può contribuire a dare informazioni sulle caratteristiche dell'oggetto.

2 RIVELATORI DI RADIAZIONE VISIBILE

Dedichiamo questa sezione a discutere brevemente le proprietà di alcuni tipi di rivelatori di radiazione visibile e a mettere in evidenza la necessità di uno studio approfondito allo scopo di poter inquadrare (per i fini della ricerca in discussione) l'enorme numero di rivelatori esistenti e soggetti a continua evoluzione.

Cominciamo dalle emulsioni fotografiche. Le loro proprietà sono così note da non richiedere grossi richiami. Ci limitiamo a svolgere alcune considerazioni e a mettere in rilievo alcuni aspetti che possono avere interesse nell'ambito dei nostri problemi.

Una prima considerazione è che, nonostante il vastissimo uso che se ne fa e la mole di studi compiuti, le emulsio-

ni fotografiche sono forse, fra i rivelatori di radiazioni, quelli per i quali sono meno chiari i principi teorici. Questo fatto, unito al numero di agenti che intervengono nell'intero processo fotografico, fa sì che le emulsioni, pur essendo insostituibili nella registrazione dell'informazione ottica, soffrano di talune limitazioni dal punto di vista metrologico.

Una seconda considerazione è che il processo fotografico comprende un'importante fase di amplificazione del segnale. Difatti la radiazione luminosa serve solo a fornire la energia necessaria a formare la cosiddetta immagine latente (si pensa che sia sufficiente una decina di fotoni per granulo) mentre l'energia richiesta per trasformare tutto il granulo di alogenuro d'argento in argento metallico (estendendo quindi a tutto il granulo una modificazione indotta dalla luce in una piccolissima regione) viene fornita durante il processo di sviluppo. Ciò rende conto del fatto che le emulsioni fotografiche risultano molto più sensibili di altri rivelatori nei quali non si ha un analogo processo di amplificazione.

In uno schema molto semplificato, un'emulsione fotografica può essere considerata come un insieme di rivelatori binari distribuiti su una certa area. Il singolo rivelatore binario rappresenta il granulo di alogenuro d'argento che al termine del processo o è trasformato in argento metallico oppure è rimosso ad opera del fissaggio. Il segnale da rivelare ha due aspetti essenziali: il primo è la sua distribuzione spaziale e il secondo è la sua dinamica entro l'area complessivamente esaminata. Detto in altri termini, l'emulsione è chiamata in primo luogo a dare una mappa della distribuzione d'intensità entro una certa area ed in secondo luogo a conservare i rapporti di intensità in punti distinti. Il processo in base al quale l'emulsione assolve tale compito è di tipo statistico. Qualitativamente parlando, alla fine del processo i granuli d'argento saranno più fittamente distribuiti là dove l'intensità era maggiore. Il parametro che rappresenta la risposta finale dell'emulsione è la trasparenza mediata, nello intorno di ogni punto, su un'areola di dimensioni lineari abbastanza grandi rispetto a quelle del singolo granulo. È usuale esprimere la relazione fra eccitazione e risposta mediante la curva HD (Hurter e Driffield) che dà il logaritmo dell'opacità (inverso della trasparenza di intensità) in funzione del

logaritmo dell'esposizione (prodotto intensità-tempo di esposizione). Come è noto tale curva comprende un tratto centrale circa lineare la cui pendenza prende il nome di fattore di contrasto. Per una fissata emulsione, il fattore di contrasto dipende fortemente dal tipo di sviluppatore usato e dal tempo di sviluppo, potendo ad es. cambiare da uno a dieci al variare di questi. Questo fatto notissimo, assieme ad altri meno noti come l'effetto Eberhard (in base al quale fra due areole di diversa grandezza, esposte e sviluppate allo stesso modo, ha opacità maggiore quella di dimensioni minori), mette subito in evidenza come sia difficile ottenere delle misure precise della distribuzione di intensità a partire dall'esame della trasparenza finale dell'emulsione. Altre cause che concorrono a determinare questa situazione sono: la finitezza della latitudine di posa (dipendente dall'intervallo di esposizione corrispondente alla zona lineare della curva HD), la dipendenza della sensibilità dell'emulsione dalla lunghezza d'onda della radiazione (anche nelle cosiddette pancromatiche), la variazione delle caratteristiche di uno stesso tipo di emulsione da uno stock all'altro, ecc. Questo stato di cose fa sì che le emulsioni siano scarsamente adatte per la registrazione quantitativa della dinamica del segnale luminoso entro l'area esaminata. Tuttavia, in un certo numero di casi importanti, la registrazione, anche poco fedele, della distribuzione spaziale di intensità contiene già gli elementi di informazione voluti. Un primo esempio di ciò è offerto dalla fotogrammetria. Si pensi alla determinazione delle coordinate spaziali di un certo punto oggetto. Ciò che è richiesto è di poter misurare la posizione dell'immagine di tale punto sui due fotogrammi. Basta cioè poter riconoscere il punto di interesse entro i fotogrammi. Per quanto ciò sia fatto dall'osservatore in base ad un esame della distribuzione spaziale di trasparenza (è in virtù di questa che egli può riconoscere la configurazione dell'intorno del punto), è chiaro che si possono tollerare distorsioni anche severe della dinamica senza mettere in pericolo la possibilità di individuare il punto con certezza.

Come ulteriore esempio si consideri la registrazione di un ologramma. Come caso rappresentativo del tipo di segnale da registrare si può pensare ad una distribuzione sinusoidale di intensità intorno ad un certo valor medio. L'informazione relativa è contenuta nella profondità di modulazione della sinusoidale (ampiezza) e nella posizione dei massimi rispetto ad un opportuno riferimento (fase). Una risposta distor-

ta dell'emulsione non cambierà la posizione dei massimi, conservando quindi correttamente l'informazione di fase, mentre altererà, in ricostruzione, il valore dell'ampiezza. Tradotto in termini concreti ciò significa che l'insieme dei punti oggetto sarà ricostruito con le corrette relazioni di fase e con distorte relazioni di ampiezza. Se si tiene conto del fatto che in molte applicazioni dell'olografia si sfrutta essenzialmente l'informazione di fase, si vede che anche in questo caso la esistenza di distorsioni dinamiche può non avere conseguenze negative.

Una caratteristica rilevante delle emulsioni nei confronti di altri rivelatori è quella data dal potere risolutivo che, almeno nelle emulsioni per usi speciali, può raggiungere valori molto elevati (2000 - 3000 linee/mm). Ciò le rende preziose per l'olografia e memorie ottiche.

Ci siamo finora riferiti ad emulsioni bianco e nero. Le limitazioni dette per esse, riguardo alla registrazione della dinamica del segnale, si applicano a più forte ragione alle emulsioni per il colore. Con la grossa differenza che in questo caso l'informazione dinamica sarebbe l'unica importante, quella configurazionale essendo già contenuta nel b.n.. A ciò si aggiungano alcune difficoltà intrinseche come quella costituita dal fatto che tali emulsioni lavorano con tre colori primari (reali e non saturi). Come si è visto in precedenza, l'area del diagramma cromatico che può essere coperta usando tre soli colori (con coefficienti positivi) è sempre più piccola dell'area totale. Cioè, certi colori non potranno alla fine essere riprodotti. (E' tipica, ad esempio, la differenza fra lo spettro di una luce bianca visto in uno spettroscopio e composto di soli colori saturi ed una sua riproduzione fotografica con colori necessariamente desaturati). Si pensi, per fare un confronto, che una buona riproduzione a stampa di un soggetto a colori può richiedere una decina e più di inchiostri colorati differenti.

Una registrazione fotografica del colore (per le opere d'arte) andrebbe quindi studiata lungo le seguenti linee :
a) valutazione fatta in base alla conoscenza dei materiali usati nelle opere d'arte (in particolare dipinti) e corroborata da misure colorimetriche su un campione statistico di opere, intesa a definire la regione del diagramma cromatico che è effettivamente necessario saper riprodurre; b) determinazione del nume-

ro di colori primari (reali) necessari per coprire tale area;
c) realizzazione di filtri adatti ad isolare detti primari;
d) registrazione attraverso tali filtri delle immagini parziali dell'opera su emulsioni b.n. delle quali sia stata determinata la sensibilità cromatica e per le quali si attui una standardizzazione del processo di sviluppo. La riproduzione potrebbe poi ottenersi per proiezione sovrapposta, attraverso i medesimi filtri, di copie positive delle immagini registrate. Per misure alle quali non sia richiesta una precisione molto spinta, tale metodologia potrebbe risultare sufficientemente rapida ed economica rispetto ad altre più elaborate e costose (ad esempio scansione con testa spettrofotometrica).

Oltre alle emulsioni fotografiche, esistono rivelatori estesi che possono avere interesse principalmente per l'olografia e le memorie ottiche. Un primo esempio è quello delle gelatine al bicromato (di sodio o di potassio o di ammonio). Queste gelatine diventano insolubili in acqua se esposte alla radiazione luminosa. Se dopo l'esposizione la gelatina viene lavata, essa si assottiglia nelle regioni ove la radiazione era più debole. L'oggetto che ne risulta è, come suol dirsi, una trasparenza di pura fase, cioè altera la fase ma non l'ampiezza di un'onda che vi incida. Con tali gelatine si possono allora realizzare ologrammi di fase che hanno la caratteristica di avere una grande efficienza di diffrazione. Il potere risolutivo è elevatissimo (diverse migliaia di linee al millimetro). Tuttavia ci sono vari inconvenienti. Tali gelatine hanno una risposta spettrale che è massima nella zona dell'ultravioletto e del bleu e che arriva a malapena a coprire una parte del verde. Nel rosso la loro risposta è nulla. Anche nel bleu la sensibilità è circa 1000 volte inferiore a quella di un'emulsione fotografica per olografia. Non sono disponibili in commercio e vanno quindi preparate volta a volta in laboratorio. Anche le gelatine, come le emulsioni, non possono essere cancellate e riusate.

Altri materiali (pure con risposta di fase) offrono invece la possibilità di cancellazione, ciò che li rende interessanti per memorie ottiche non di sola lettura. Citiamo i materiali termoplastici nei quali, traducendo una distribuzione di intensità luminosa in una distribuzione di carica elettrica con un procedimento analogo alla xerografia, si sfruttano forze elettrostatiche per far variare, in accordo alla di-

istribuzione di intensità, lo spessore di un foglio di plastica riscaldata alla temperatura di rammollimento e poi raffreddata. La cancellazione si ottiene per riscaldamento (in assenza di sforzi). La sensibilità, pur essendo superiore a quella delle gelatine, rimane bassa. Il potere risolutivo non è elevatissimo (circa mille linee al millimetro) ma sufficiente per molti usi (olografici). Si tratta anche qui di materiali non in commercio. Accenniamo infine ai materiali ferro-elettrici nei quali si hanno piccole variazioni di indice di rifrazione in seguito ad illuminazione intensa. Possono essere cancellati sempre mediante illuminazione o con altri mezzi (ad es., forti campi elettrici). La loro sensibilità è molto bassa (4-5 ordini di grandezza al di sotto delle emulsioni). Tuttavia sono attualmente molto studiati per le memorie (read-write) perchè offrono dei tempi di scrittura e cancellazione sufficientemente bassi.

Dovremmo ora dire qualcosa sulla famiglia dei fotorivelatori elettronici. Si tratta di una famiglia vastissima e tuttavia in continua e rapida evoluzione, specie nell'ambito dei dispositivi a stato solido. Basti accennare ai rivelatori piroelettrici che nel giro di pochi anni sono passati dallo stato di curiosità scientifica a quello di strumenti commerciali di vasto impiego. Caratterizzati da una banda di risposta eccezionalmente larga (sono stati usati con successo dai raggi X molli alle onde submillimetriche, cioè su un intervallo di lunghezze d'onda di sei ordini di grandezza), essi hanno mostrato di poter operare (a temperatura ambiente) con buona sensibilità, basso rumore e brevissimi tempi di risposta (inferiori al nanosecondo). Ciò ha portato al loro uso in moltissime applicazioni come spettrometria, radiometria, misure di temperatura a distanza, diagnostica laser, formazione di immagini nell'infrarosso. Oppure accennare ai CCD (Charge Coupled Devices) mediante i quali si possono costruire matrici di sensori con dimensioni lineari di qualche decina di micron (ad es. 10.000 sensori in una piastrina di pochi millimetri quadrati) ognuno dei quali può essere interrogato individualmente. Dispositivi di questo tipo, nei quali la posizione di ogni sensore è accuratamente nota e che permettono quindi precise determinazioni della geometria di un'immagine, si riveleranno preziosi nelle misure metriche sulle immagini quali, ad es., quelle effettuate in fotogrammetria. Anche in questo caso, ricerche iniziate appena quattro o cinque anni fa hanno portato a disposi-

tivi già disponibili commercialmente e per i quali è facile prevedere ulteriori sviluppi e miglioramenti.

Pertanto è praticamente impossibile dare, in breve, un quadro che non risulti estremamente lacunoso sui fotorivelatori elettronici. Si tenga presente che anche i rivelatori noti da più tempo (cellule fotoconduttrici e fotovoltaiche, fotomoltiplicatori, fotodiodi, fototransistori, ecc.) vengono migliorati di continuo. Possiamo solo dire che tale argomento esigerà una ricerca molto accurata nell'ambito dello studio sullo "Stato dell'arte".

3 METODI DI RILEVAMENTO, STUDIO E DOCUMENTAZIONE

3 1 Fotogrammetria

Consideriamo un obiettivo che formi l'immagine reale (capovolta) di un oggetto. In fig. 4 esso è schematizzato mediante una lente sottile. Si riporti mentalmente l'immagine dal piano π in cui si forma al piano π' simmetrico di π rispetto al piano della lente e la si ribalti. E' allora chiaro che il piano π' nel quale è riportata l'immagine rappresenta il cosiddetto quadro o piano prospettivo di una prospettiva centrale che ha come centro di vista il centro O della lente e come punto principale il punto P', intersezione di π' con l'asse ottico (quest'ultimo giuoca il ruolo di asse visuale principale). La cosiddetta distanza principale (distanza dal centro di vista al quadro) coincide con la distanza fra piano della lente e piano immagine. Tutto ciò si estende facilmente al caso in cui l'obiettivo non sia assimilabile ad una lente sottile. In tal caso occorrerà riferirsi ai punti nodali del sistema ottico (se a destra e a sinistra dell'obiettivo vi è lo stesso mezzo ottico, ad esempio aria, i punti nodali coincidono con quelli che in ottica si chiamano punti principali, ma l'uso di questa locuzione genererebbe confusione con i punti principali di cui si parla nella prospettiva, definiti diversamente). Con riferimento alla fig. 5, in cui N_1 e N_2 sono i punti nodali, la distanza principale è ora uguale a N_2P^2 e va riportata nello spazio oggetto a partire da N_1 che rappresenta il centro di vista.

Fotografando l'immagine reale detta si dispone per-

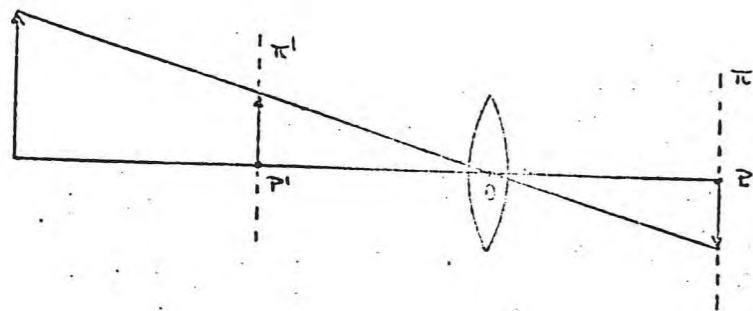


fig. 4

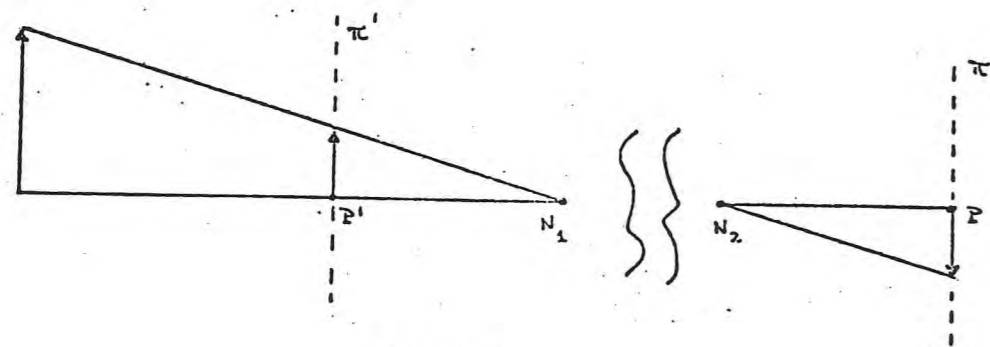


fig. 5

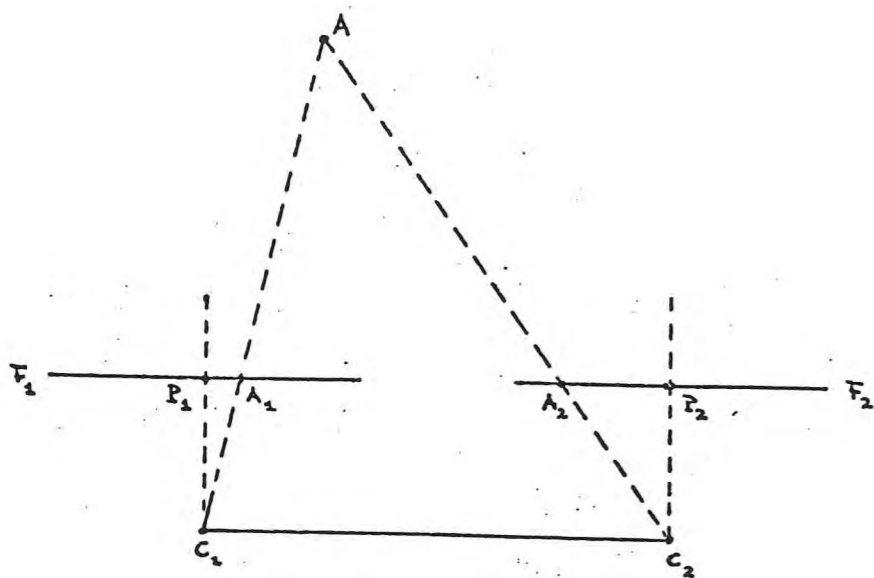


fig. 6

ciò di una vista prospettica dalla quale, una volta nota la distanza principale, possono ricavarsi le coordinate angolari rispetto all'asse ottico dei vari punti oggetto. Si suppone in generale che l'asse ottico sia orizzontale ma, se ciò non accade, è semplice riportare le coordinate misurate a quelle relative ad un asse orizzontale (occorre ovviamente conoscere l'angolo formato dall'asse ottico con l'orizzontale). Su queste considerazioni si basano le tecniche della fotogrammetria. Oggigiorno, peraltro, la fotogrammetria è intesa quasi esclusivamente come stereofotogrammetria. In quest'ultima l'uso di due viste prospettiche prese fotograficamente dagli estremi di un'opportuna base permette anche il rilevamento delle distanze dei punti oggetto dal piano verticale contenente la base. In fig. 6, i punti C_1 e C_2 rappresentano i punti di vista delle due viste prospettiche riprese agli estremi della base b disposta orizzontalmente, con entrambi gli assi visuali (C_1P_1 e C_2P_2) normali alla base (caso della ripresa normale). F_1 e F_2 sono le tracce dei due fotogrammi. A_1 e A_2 sono le immagini, sui due fotogrammi, di un punto A che, per semplicità, ammettiamo si trovino sulle linee d'orizzonte (la retta orizzontale che, nel piano prospettico, passa per il punto principale). È immediato vedere come A possa essere individuato dall'intersezione delle semirette da C_1 ad A_1 e da C_2 ad A_2 . È questa l'idea base del procedimento di restituzione.

Affinchè le precedenti considerazioni possano essere utilizzate in pratica, è necessario che l'apparecchio con cui si riprendono le fotografie (camera fotogrammetrica) soddisfi certe esigenze. Il piano nel quale si riprende l'immagine dovrà essere rigorosamente perpendicolare all'asse ottico dell'obiettivo. In generale, l'immagine sarà registrata su lastra anziché su pellicola per essere sicuri della planità durante la registrazione e della stabilità di configurazione nelle operazioni successive. Nell'immagine registrata (fotogramma) devono potersi individuare con precisione le due rette (orizzontale e verticale) che passano per il punto principale. A tale scopo, devono venire registrati automaticamente sul fotogramma opportuni segni di riferimento. Ciò è ottenuto disponendo sul fondo della camera delle mascherine al centro di ogni lato del fotogramma. La camera deve essere tale da permettere di conoscere con estrema precisione (al centesimo di millimetro) la distanza principale (dal secondo punto nodale al piano immagine). Ciò

comporta l'uso di delicati dispositivi meccanici di spostamento se la camera deve disporre di una messa a fuoco. Di conseguenza, in molti casi, la camera è del tipo a fuoco fisso, cioè senza possibilità di variare la distanza obiettivo-lastra. La distanza principale è allora fissata in sede di costruzione della camera ed è nota con la precisione richiesta. E' ovvio che una camera di questo tipo è in grado di fornire immagini nitide solamente di oggetti che si trovino al di sopra e al di sotto di una certa distanza, minima e massima rispettivamente. Usando obiettivi non molto luminosi (diaframma 1:5.6) e scegliendo opportunamente la distanza principale (leggermente superiore alla distanza focale) si possono ottenere camere che danno immagini nitide su un campo sufficientemente profondo (per esempio tra un metro ed una decina di metri oppure tra qualche metro ed infinito). Infine l'obiettivo dovrà essere sufficientemente corretto rispetto ai vari tipi di aberrazione da fornire immagini sensibilmente indistorte su tutto il campo di vista (con aperture angolari che possono raggiungere i 90°).

L'applicazione dei metodi fotogrammetrici ai rilievi di monumenti è stata oggetto di molti studi ed oggi costituisce una tecnica molto precisa ed affidabile. Esiste sul mercato tutta una gamma di apparecchiature adatte a tale scopo. E' chiaro che l'apparecchiatura più versatile sarebbe una camera fotogrammetrica a distanza principale variabile e con possibilità di cambiare l'inclinazione (rispetto all'orizzontale) dell'asse ottico. Con essa potrebbero riprendersi successivamente i due fotogrammi agli estremi di una base scelta caso per caso e scegliendo l'angolo fra gli assi ottici nelle due posizioni in modo da realizzare sia la ripresa normale che quella convergente. Tuttavia l'uso di tale apparecchiatura ha l'inconveniente di richiedere del personale particolarmente qualificato e quello di rendere lunghe e delicate le operazioni di ripresa. Per tali motivi sono state realizzate delle apparecchiature costituite da una coppia di camere fotogrammetriche a fuoco fisso, con assi ottici paralleli, vincolate agli estremi di un tubo metallico. Gli assi ottici possono assumere solamente certe inclinazioni rispetto all'orizzontale. E' ovvio che un'apparecchiatura di questo tipo può essere usata solo per certi rilievi: non sono possibili riprese ad assi convergenti, la profondità di campo e la base sono fissate. In compenso, l'uso è mol-

to semplificato e le riprese richiedono poco tempo.

Per la fase di restituzione possono essere utilizzate apparecchiature di tipo analogico basate sul seguente principio. Un sistema ottico binoculare permette di osservare contemporaneamente i due fotogrammi, uno per occhio. L'osservatore ha così la sensazione della profondità della scena osservata. Giocando sul rapporto fra la lunghezza della base usata per le riprese e la distanza fra i fotogrammi al momento della restituzione, l'effetto di profondità può essere facilmente esaltato. Attraverso gli oculari dell'apparecchio l'osservatore vede anche due contrassegni (analoghi agli ordinari reticoli di mira) che, in virtù della visione stereoscopica, danno la sensazione di fondersi insieme librati nello spazio. Variando la distanza reale tra i due contrassegni l'osservatore ha l'impressione di uno spostamento in profondità dell'unico contrassegno apparente. Uno spostamento solidale di entrambi i contrassegni in senso trasversale cambia invece la posizione trasversale del contrassegno apparente. In tal modo, l'osservatore può portare in coincidenza visuale il contrassegno con un qualunque punto oggetto, e ad esempio, fargli descrivere una linea di livello spostandolo solo in senso trasversale e mantenendo il contatto ottico con la superficie dell'oggetto. Gli spostamenti del contrassegno vengono tradotti, mediante dispositivi elettromeccanici, in spostamenti della punta di un registratore grafico.

Anche per quanto riguarda le apparecchiature di restituzione esistono sul mercato molti modelli. Da quelli più semplici, adatti solo per riprese ad assi paralleli e con inclinazioni prefissate sull'orizzontale, a quelli cosiddetti universali, più versatili ma anche molto più complessi e costosi.

Va detto infine che il metodo di restituzione più promettente oggi è il metodo della fotogrammetria analitica. In esso, a partire da misure metriche di precisione eseguite direttamente sui due fotogrammi, si utilizza un calcolatore elettronico per l'immagazzinamento e l'elaborazione dei dati. Le unità terminali (video, plotter) del calcolatore permettono poi di ottenere le rappresentazioni grafiche. Utilizzando i dati di molte coppie di fotogrammi è possibile ottenere dal calcolatore le più diverse rappresentazioni dell'oggetto: pian-

te, sezioni, viste prospettiche da centri variabili e così via.

3 2 Olografia e trattamento ottico dell'informazione

Come precedentemente sottolineato, la tecnica di registrazione olografica differisce dalle normali tecniche fotografiche in quanto non si limita a registrare la distribuzione di intensità luminosa su un piano immagine, ma registra la completa informazione di ampiezza e fase di un fronte d'onda luminoso. Tale registrazione non deve necessariamente avvenire in un piano immagine ed anzi normalmente si effettua nel piano della trasformata di Fourier dell'immagine stessa.

Sebbene i principi dell'olografia siano ben noti, giova ricordarne brevemente le caratteristiche essenziali al fine di evidenziare alcuni aspetti utili per le considerazioni che si intendono svolgere. In olografia l'oggetto va illuminato in luce coerente e l'onda da esso diffusa viene fatta incidere su una lastra fotografica (od altro materiale fotosensibile) posta nel piano in cui si intende effettuare la registrazione. Sul medesimo piano viene fatta incidere un'onda, detta di riferimento, di forma geometrica nota, coerente con l'onda diffusa dall'oggetto. La sovrapposizione delle due onde fra loro coerenti dà luogo a frange di interferenza, tipicamente ad interfrangia dell'ordine di grandezza di 1 micron (microfrange), la cui configurazione e profondità di modulazione sono, punto per punto, rispettivamente legate alla fase ed all'ampiezza del fronte d'onda da registrare. L'emulsione fotosensibile registra tali frange, nel senso che la funzione di trasmissione della lastra sviluppata e fissata ne riproduce l'andamento. Va però precisato, che, mentre la posizione delle frange viene fedelmente registrata, altrettanto non accade per il loro contrasto. L'annebbiamento della lastra in ogni punto è infatti, come già precedentemente osservato, una funzione non lineare dell'ampiezza del campo in quel punto. Ne consegue che, mentre la fedeltà di registrazione dell'informazione di fase è automaticamente garantita, per ottenere anche quella sull'informazione di ampiezza devono essere osservate particolari cautele (sia all'atto dell'esposizione sia all'atto dello sviluppo e del fis-

saggio della lastra) per conseguire la linearità tra ampiezza del campo incidente e funzione di trasmissione risultante. Il processo di ricostruzione dell'immagine consiste nell'illuminazione della lastra sviluppata e fissata (ologramma) con il solo fronte d'onda di riferimento. Per diffrazione dalle microfrange, riemerge dall'ologramma il fronte di onda originariamente diffuso dall'oggetto. Da esso un sistema ottico (o l'occhio stesso dell'osservatore) può formare immagini dell'oggetto corrispondenti a diversi punti di vista ed in ciò consiste la proprietà di tridimensionalità dell'immagine olografica. Già da questa proprietà scaturisce tutta una serie di ovvie applicazioni, che interessano anche il campo delle opere d'arte. Si tenga presente che attualmente si realizzano sistemi olografici in grado di permettere l'osservazione dell'oggetto da un qualsiasi punto di una superficie cilindrica (ologramma cilindrico) avvolgente l'oggetto stesso, il cui diametro può raggiungere il metro di lunghezza.

Come sopra ricordato, una prima caratteristica peculiare dell'olografia è la possibilità di registrare l'ologramma su un qualunque piano attraversato dalla radiazione diffusa dall'oggetto. Ciò comporta che l'informazione inerente ad ogni punto dell'oggetto è diffusa sull'intera superficie dell'ologramma, cosicché anche la perdita di una sua parte non comporta perdita irreparabile di informazione sull'oggetto. E' principalmente per questa proprietà che l'olografia costituisce un potente strumento per registrare un gran numero di immagini su una medesima lastra fotografica in quelle che vengono comunemente chiamate memorie olografiche. Nel campo delle opere d'arte tali memorie possono essere usate come mezzo di classificazione e di archivio. Il principio su cui si basa una memoria olografica è quello di registrare un gran numero di ologrammi di piccole dimensioni (microologrammi) uniformemente distribuiti su areole diverse di una medesima lastra fotografica. Riferendoci alle tipiche dimensioni di una lastra ($10 \times 10 \text{ cm}^2$) ed alle risoluzioni spaziali oggi comunemente possedute dalle emulsioni fotografiche per olografia (10^3 linee/mm), il contenuto di informazione di una memoria olografica dovrebbe essere dell'ordine di 10^{10} bits. Tale limite teorico può essere ulteriormente aumentato sfruttando lo spessore finito dell'emulsione fotografica per regi-

strarvi diversi ologrammi su piani situati a diversa profondità nell'emulsione (ologrammi di volume). La selezione fra i vari piani dell'ologramma di volume viene fatta, sia all'atto della registrazione sia a quello della ricostruzione, mediante l'uso di fronti d'onda di riferimento opportuni e diversi da piano a piano. Alcune memorie olografiche sono già esistenti in commercio. Si tratta di memorie di sola lettura, particolarmente adatte a fini di classificazione e di archivio. La capacità di informazione di tali memorie raggiunge i 5×10^7 bits. Il numero di microologrammi che le costituisce è dell'ordine di 10^6 . Si può osservare che la capacità di informazione delle memorie olografiche effettivamente realizzate differisce dal limite prima detto per diversi ordini di grandezza. Ciò è dovuto alla presenza di quegli effetti (ad esempio, speckles) che, in luce coerente e con ologrammi di piccole dimensioni, limitano fortemente la qualità dell'immagine causando quindi una perdita di informazione. Le ricerche sull'argomento sono tuttora in corso, particolarmente volte allo studio di nuovi materiali, anche adatti a memorie non permanenti (read-write memories).

La caratteristica essenziale dell'olografia è, come si è detto, la sua capacità di registrare sia l'ampiezza che la fase di un fronte d'onda luminoso. Questa caratteristica conduce a molteplici applicazioni; una delle più importanti è senza dubbio quella che va sotto il nome di interferometria olografica. Il principio su cui essa si basa è il seguente. Due registrazioni dell'onda diffusa dallo stesso oggetto in tempi diversi sono effettuate su un medesimo ologramma e con la stessa onda di riferimento. Il successivo processo di ricostruzione fa sì che le due onde (si noti non esistono nello stesso istante) rivivano contemporaneamente dando luogo ad effetti di interferenza che forniscono immediata informazione sulle deformazioni eventualmente subite dalla superficie dell'oggetto nel tempo intercorso tra le due registrazioni. Il metodo appena descritto va sotto il nome di interferometria olografica a doppia esposizione. Un altro metodo consiste nel produrre l'interferenza tra l'onda ricostruita da un ologramma a singola esposizione e l'onda che proviene direttamente dall'oggetto in un istante di tempo successivo a quello della registrazione dell'ologramma. La figura di interferenza che così si ottiene fornisce informazione sulla deformazione che la superficie dell'oggetto via via subisce nel corso del tempo (inter-

ferometria olografica in tempo reale). Va inoltre precisato che sebbene la figura di interferenza dia diretta informazione sullo spostamento della superficie dell'oggetto tale spostamento può essere collegato a caratteristiche interne dell'oggetto stesso. Con questo metodo si possono rivelare difetti interni di strutture e ciò è stato fatto anche nel campo delle opere d'arte come guida ad operazioni di restauro.

Lo sviluppo dei metodi sopra descritti ha dato grande impulso al settore del testing non distruttivo, creando quello che va sotto il nome di HN_{DT} (Holographic Non-Destructive Testing). Oggetti con superfici fino a dimensioni dell'ordine del metro quadrato possono essere esaminati agevolmente, con sensibilità nella rivelazione di spostamenti che può essere inferiore al decimo di micron. Tali cifre sono peraltro soltanto indicative, perchè una valutazione più precisa richiederebbe una specificazione della stabilità dell'oggetto. Dovendosi infatti registrare delle frange d'interferenza, occorre che durante il tempo di esposizione della lastra fotografica l'oggetto non subisca spostamenti superiori a piccole frazioni di lunghezza d'onda. Questa condizione è particolarmente severa per oggetti dotati di scarsa stabilità configurazionale, come ad esempio oggetti di legno. Questo materiale infatti, a causa delle variazioni di umidità e temperatura dell'ambiente circostante, è soggetto, su scala microscopica, a perenni movimenti di assestamento. Ciò comporta, affinché siano verificate le condizioni di stabilità necessarie per una buona registrazione olografica, l'assunzione di tempi di esposizione molto brevi (dipendenti comunque dalla sensibilità della lastra fotografica usata). Corrispondentemente si rende necessario l'uso di una sorgente di luce coerente (laser) di elevata potenza, tanto più quanto maggiore è la superficie dell'oggetto che deve essere illuminata. Con i laser in continua oggi disponibili, superfici di oggetti di legno fino ad un metro quadrato possono essere studiate. Per superfici maggiori è consigliabile l'uso di laser impulsati, con particolari caratteristiche che ne mantengano sufficientemente buone le proprietà di coerenza. Esistono oggi in commercio molte apparecchiature complete per HN_{DT} (quasi sempre adatte ad oggetti di dimensioni limitate), ma la delicatezza di applicazione e di interpretazione limita tuttora in pratica l'interferometria olografica allo stadio di laboratorio.

Una tecnica strettamente connessa all'interferometria olografica è quella del contouring. Nella versione più semplificata essa consiste nel registrare un ologramma di un oggetto con due differenti lunghezze d'onda e nell'effettuare il processo di ricostruzione con una lunghezza d'onda soltanto. Scegliendo opportunamente la differenza tra le lunghezze d'onda usate, vengono ricostruite due immagini sovrapposte che danno luogo ad interferenza. In ogni punto dell'oggetto l'interferenza è costruttiva o distruttiva, dipendendo dalla distanza di quel punto dal piano dell'ologramma. L'immagine dell'oggetto apparirà conseguentemente solcata da frange d'interferenza, ciascuna delle quali è il luogo di tutti i punti a distanza costante dall'ologramma. Si vengono così a disegnare sull'oggetto delle linee di livello, che ne misurano la profondità con una sensibilità che può essere dell'ordine di grandezza di una lunghezza d'onda. Tale metodologia non è ancora di uso corrente, almeno per quanto riguarda l'utilizzazione delle linee di livello ottenibili.

Un campo in cui le tecniche olografiche intervengono con frequenza è quello assai vasto ed importante del trattamento ottico dell'informazione. Uno dei principi fondamentali su cui si basano le tecniche di trattamento ottico dell'informazione in luce coerente è il fenomeno per cui, posta la immagine nel primo piano focale di una lente, nel secondo piano focale si ottiene lo spettro (bidimensionale) di frequenze spaziali dell'immagine stessa. La disponibilità dello spettro rende possibile tutta una serie di operazioni (convoluzione, autocorrelazione, filtraggio) che costituiscono l'analogo bidimensionale delle operazioni compiute elettronicamente sui segnali dipendenti dal tempo. Tra le applicazioni di queste tecniche basti ricordare il riconoscimento di configurazioni, l'estrazione della differenza fra due immagini (anche se registrate in luce incoerente), la possibilità di esaltare il contrasto o altre caratteristiche dell'immagine. La disponibilità dello spettro consente pure semplici operazioni di confronto o di verifica delle frequenze spaziali presenti. Queste operazioni possono condurre all'identificazione di certe caratteristiche di periodicità presenti in un'immagine in modo assai più rapido e semplice che tramite l'ispezione diretta dell'immagine stessa. Nel campo delle opere d'arte si trovano già esempi di applicazioni di questo tipo.

Comunque, sia per le tecniche più propriamente olo

grafiche, sia per il più vasto campo delle tecniche di trattamento ottico dell'informazione, va ribadito che allo stato attuale se ne può facilmente disporre soltanto nell'ambito di un laboratorio e con personale specializzato, anche se non mancano significativi tentativi di una più vasta applicazione ed anche se si può ragionevolmente prevedere che il progresso tecnologico ridurrà in breve tempo le difficoltà di impiego.

3 3 Colorimetria

Come si è visto in precedenza, la sensazione di colore determinata da una radiazione luminosa può essere individuata mediante un punto del diagramma cromatico e quindi mediante due coordinate. Si è già rilevato che ciò non individua lo spettro della radiazione, dato che lo stesso punto del diagramma può essere ottenuto con infinite distribuzioni spettrali diverse. Pertanto, una caratterizzazione più completa della radiazione richiede la conoscenza del suo spettro.

Nell'ambito dello studio dei metodi di rilevamento e caratterizzazione di un'opera d'arte, queste considerazioni intervengono quando si sia interessati a rilevare quelli che, nel linguaggio ordinario, si chiamerebbero i colori dell'opera d'arte. E' ovvio che la locuzione "colore di un oggetto" di per sé non ha senso, potendo uno stesso oggetto apparire di colore diverso al variare del tipo di illuminazione, ed acquistare significato solo quando si precisi lo spettro della radiazione usata per illuminarlo. In quest'ultimo caso, il "colore dell'oggetto" è il colore della radiazione diffusa dallo oggetto. In base alle osservazioni iniziali, si può allora caratterizzare più completamente l'oggetto dando la curva che, per ogni lunghezza d'onda nel visibile, fornisce il coefficiente di diffusione dell'oggetto. Sembrerebbe allora che per i nostri scopi più della colorimetria abbia interesse la spettrofotometria. Per quanto ciò possa essere vero per un certo numero di problemi, in generale le tecniche colorimetriche vanno prese in considerazione per almeno due ordini di motivi. In primo luogo, è ovvio che, specialmente per certe opere d'arte (dipinti), le informazioni colorimetriche sono essenziali per definire lo stato dell'opera proprio ai fini della fruizione. In secondo luogo occorre tenere presente che i risultati di una analisi dettagliata della risposta spettrofotometrica, punto

per punto della superficie di un'opera, possono costituire una mole di informazione così rilevante da comportare seri problemi di immagazzinamento dei dati. Da questo punto di vista, il sintetizzare i risultati in termini colorimetrici può offrire una considerevole riduzione dell'informazione da immagazzinare. Tanto per fare un esempio, si supponga di voler registrare i dati spettrofotometrici relativi ad un dipinto con un'area di 1 m^2 suddividendolo in celle di 1 mm^2 . Si ha allora un milione di punti di misura in ognuno dei quali va registrata la curva del coefficiente di diffusione in funzione della lunghezza d'onda. Campionando la curva ad intervalli di qualche nanometro (ordine di grandezza dell'intervallo di lunghezza d'onda che si ottiene facilmente all'uscita di un monocromatore e tipico della risoluzione in lunghezza d'onda usata in colorimetria) si ha un centinaio di campioni nello spettro del visibile (nominalmente da 380 a 780 nanometri). Il risultato della misura per ogni campione può richiedere 16 bits. Perciò complessivamente, si deve registrare una quantità di informazione dell'ordine di 10^9 bits. Se si tiene presente che una bobina di nastro magnetico del tipo normalmente usato per le memorie dei calcolatori ha una capacità dell'ordine di 10^8 bits, si vede che per l'immagazzinamento dei dati di un solo dipinto del tipo detto sarebbero necessarie una decina di bobine di nastro. E' chiaro che a questo punto può essere consigliabile limitarsi a registrare, per ognuna delle celle, le sole coordinate colorimetriche, ciò che riduce di un paio di ordini di grandezza la quantità di informazione da immagazzinare.

Soffermiamoci ora sulle possibilità di misura esistenti nel campo della spettrofotometria e della colorimetria. Gli spettrofotometri, che basilamente sono strumenti per la misura della composizione spettrale di una radiazione luminosa, esistono in numerosissime versioni. Ciò è dovuto al fatto che le caratteristiche dello strumento sono differenti a seconda dell'applicazione a cui è destinato (chimica, fisica, biologia, ecc.). Tuttavia, in linea di massima, tutti gli spettrofotometri comprendono una sorgente di energia radiante, un monocromatore, un rivelatore ed un registratore. In generale, uno spettrofotometro è in grado di coprire non solo la regione spettrale del visibile ma anche porzioni più o meno estese dell'ultravioletto e dell'infrarosso. La sorgente di cui dispone lo strumento (generalmente una lampada a fila-

mento di tungsteno, altre volte allo xenon o al mercurio) emette uno spettro continuo noto che il monocromatore permette di utilizzare in bande discrete di lunghezze d'onda. Il monocromatore può essere di tipo dispersivo (se usa prismi o reticoli) o a filtri (che possono essere a pasta o interferenziali). La radiazione della sorgente viene modificata dall'interazione con il campione (subito prima o subito dopo il monocromatore) ed inviata al rivelatore. Questo è quasi sempre di tipo fotoelettrico (ad esempio un fotomoltiplicatore od una cella fotovoltaica) e la sua uscita è trasmessa ad un registratore. Per quanto la maggior parte degli spettrofotometri sia prevista per misure in trasmissione (la radiazione della sorgente attraversa il campione), esistono strumenti adatti anche a misure su campioni riflettenti o diffondenti. Per misure con (o di) luce diffusa, essi fanno uso di sfere integratrici (sfere cave verniciate internamente con un materiale bianco diffondente). Molti strumenti lavorano per confronto tra il campione in esame ed un campione standard (MgO , BaSO_4).

Tutti questi strumenti non sono direttamente adatti a misure che vadano eseguite punto per punto (o areola per areola) di un dipinto. Per questo tipo di misure, sono state ultimamente studiate delle versioni modificate di spettrofotometro nelle quali la radiazione uscente dal monocromatore è condotta, attraverso un fascio di fibre ottiche, ed una testa mobile in tre dimensioni che contiene anche il fotomoltiplicatore e mediante la quale è possibile operare una scansione sull'area del dipinto. La ripetibilità delle misure ottenibili con uno strumento di questo tipo è, per ora, dell'ordine di qualche per cento e quindi non troppo buona. Si tenga presente che la stabilità e la riproducibilità delle caratteristiche di alcuni componenti di uno spettrofotometro richiedono attenzioni particolari. Ad esempio, lo spettro emesso dalla sorgente può cambiare per variazioni della tensione di alimentazione o per invecchiamento, la risposta spettrale del fotorivelatore dipende dalla temperatura a cui lavora e così via. A ciò si aggiunga, per gli strumenti detti ora, l'effetto degli errori di riposizionamento. Concludendo, si tratta di un campo nel quale è ancora richiesto un notevole lavoro di ricerca di laboratorio.

Per quanto riguarda la colorimetria, c'è relativamente poco da aggiungere. Difatti, molti dei colorimetri oggi usati sono in pratica degli spettrofotometri modificati in uscita.

Come si ricorderà, si passa dallo spettro di una radiazione ai suoi coefficienti cromatici moltiplicando lo spettro per le funzioni di distribuzione ed integrando il risultato. Pertanto è sufficiente che, all'uscita dello spettrofotometro, venga inserito un integratore digitale. Alcuni colorimetri compiono l'operazione detta per via analogica. Essi sfruttano dei filtri ognuno dei quali ha un fattore di trasmissione (in funzione della lunghezza d'onda) tale che, antepo-ndo il filtro al fotorivelatore, la combinazione filtro-fotorivelatore abbia una risposta spettrale che riproduce una delle funzioni di distribuzione. L'integrazione è automaticamente compiuta dal fotorivelatore, l'uscita del quale fornisce (cambiando filtro successivamente) i coefficienti cromatici richiesti.

3 4 Fotoelasticimetria

Alcuni materiali trasparenti alla radiazione visibile ed otticamente isotropi in condizioni normali, diventano birifrangenti se sottoposti a sforzi. Su questo fenomeno si basano i metodi fotoelastici di determinazione degli sforzi. Lo schema di un dispositivo fotoelastico è mostrato in fig. 7. Un fascio di luce L attraversa un primo polarizzatore lineare P_1 , il campione C ed un secondo polarizzatore lineare P_2 incrociato rispetto a P_1 . Se il campione C è otticamente isotropo, la radiazione polarizzata da P_1 viene estinta da P_2 . Supponiamo ora che il campione sia soggetto a sforzi. In figura sono indicati gli assi x e y lungo i quali sono diretti gli sforzi principali σ_x e σ_y . Il campione diventa birifrangente. Scomponendo la radiazione proveniente da P_1 nelle sue due onde componenti lungo gli assi x e y , tali onde si propagano nel campione con velocità differenti ed all'uscita del campione risultano sfasate di un certo angolo (dipendente dalla differenza fra gli sforzi principali, dalle costanti fotoelastiche del materiale, dallo spessore del campione e dalla lunghezza d'onda della radiazione usata). In generale, tali onde ricomponendosi non danno una semplice onda polarizzata linearmente lungo P_1 e quindi una parte di esse oltrepassa P_2 . È importante osservare però che l'estinzione continua ad aver luogo se uno degli sforzi principali è diretto lungo l'asse di P_1 . In questo caso infatti, delle due onde componenti che si propagano nel campione, una ha ampiezza

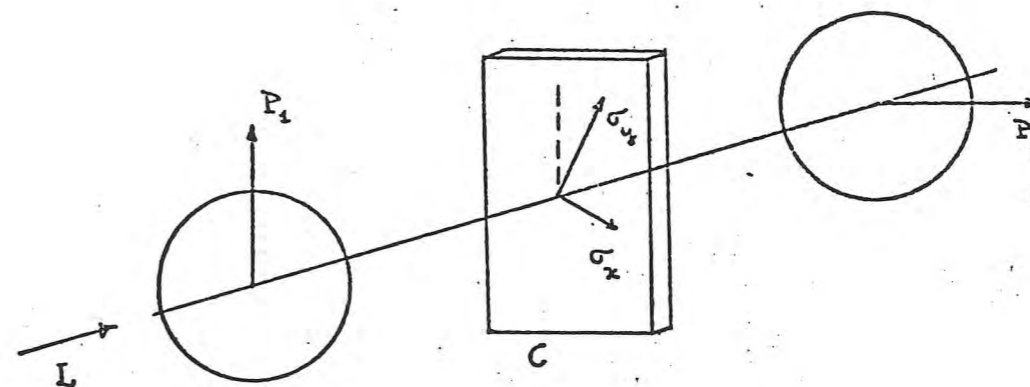


fig. 7

nulla e quindi la radiazione oltre il campione è ancora polarizzata lungo l'asse di P_1 . Si comprende così come, ruotando il campione nel piano xy (ovvero ruotando simultaneamente P_1 e P_2 in modo che rimangano incrociati), sia possibile individuare le direzioni degli sforzi principali entro il campione. Una volta fatto ciò, se si introducono due lamine a quarto d'onda, una subito dopo P_1 e l'altra subito prima di P_2 , si elimina la dipendenza dell'effetto dalle direzioni degli sforzi principali e si può passare alla determinazione della grandezza degli sforzi.

Da quanto detto risulta chiaro che la fotoelasticimetria è particolarmente adatta per lo studio di modelli bidimensionali. Per lungo tempo ciò ha costituito il suo limite principale. La situazione è però cambiata da quando sono state ideate due nuove tecniche. La prima è quella del congelamento degli sforzi. In essa si realizza innanzi tutto un modello della struttura tridimensionale da studiare, usando un opportuno materiale fotoelastico (in generale una resina epossidica). Il modello viene riscaldato fino al punto di rammollimento e gli vengono applicati (in opportuna scala) i carichi corrispondenti a quelli cui sarà soggetta la struttura reale. Il modello viene poi riportato lentamente alla temperatura ordinaria. Le deformazioni prodotte nel modello ad alta temperatura restano allora congelate in esso e permangono anche rimuovendo i carichi. A questo punto è possibile esaminare la distribuzione degli sforzi entro la struttura tridimensionale tagliando il modello in fette che vengono studiate con il metodo descritto all'inizio.

La seconda tecnica è quella dei rivestimenti fotoelastici consistente nell'incollare uno strato di materiale fotoelastico sulla superficie dell'oggetto del quale si vogliono studiare le deformazioni e nel compiere lo studio fotoelastico lavorando in riflessione anziché in trasmissione. Essa pertanto non richiede l'uso di modelli, ma si applica direttamente all'oggetto. Per oggetti di forma esterna complessa, lo strato fotoelastico viene preparato volta per volta a partire da plastiche liquide ed adattato alla superficie del campione prima che sia indurito.

La strumentazione necessaria per compiere misure fotoelastiche (polariscopi in trasmissione e riflessione) così come i materiali e le attrezzature necessarie per realizzare i modelli o i rivestimenti sono oggi disponibili sul mercato e ciò permette di annoverare la fotoelasticimetria fra le tecniche standard di laboratorio.

BIBLIOGRAFIA

- 1) M. BORN, E. WOLF : Principles of Optics, Pergamon Press, Oxford 1965
- 2) J.W. GOODMAN : Introduction to Fourier Optics, Mc Graw-Hill, New York, 1967.
- 3) R.J. COLLIER, C.B. BURCKHARDT, L.H. LIN : Optical Holography, Academic Press, New York 1971
- 4) H.D. WRIGHT : The Measurement of Colour, Hilger and Watts, London 1964.
- 5) G.W. WYSZECKI, W. S. STILES : Color Science, Wiley, New York 1967
- 6) S. REDNER : Photoelasticity, Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Vol. 9, Wiley, New York 1968
- 7) H. FORAMITTI : La photogrammetrie au service des conservateurs, Centre International pour la Conservation, 1970
- 8) M. CARBONNELL : Quelques aspects du relevé photogrammetrique des monuments et des centres historiques, Centre International pour la Conservation, 1974
- 9) C.E.K. MEES, T.H. JAMES : The Theory of the Photographic Process, Macmillan, New York 1966.

3 CARATTERISTICHE TERMOIGROMETRICHE DI AMBIENTI MATERIALI
E STRUTTURE

M. Paribeni

A. Merlani

INDICE ANALITICO1 GRANDEZZE FISICHE SPECIFICHE

- 1 1 Temperatura dell'aria e di altri fluidi, temperatura delle superfici delle pareti perimetrali e degli oggetti
- 1 2 Velocità dell'aria
- 1 3 Umidità relativa dell'aria
- 1 4 Contenuto d'acqua nei solidi porosi

2 INTRODUZIONE RAZIONALE DEL CONCETTO DI TEMPERATURA

- 2 1 Scale della temperatura: (normale, assoluta, internazionale)
- 2 2 Misura della temperatura: strumenti a dilatazione lineare e cubica e a variazione di pressione; strumenti elettrici (termocoppie e termoresistenze); strumenti ottici (radiometri)
- 2 3 Strumenti segnalatori per l'esecuzione di comandi; termostati; strumenti registratori; apparecchiature speciali (termovisione, termografia fotografica)
- 2 4 Criteri di scelta e metodi di utilizzazione dei diversi tipi di termometri

3 MISURA DELLA VELOCITA' DELL'ARIA IN CONDOTTI E IN CAMPO LIBERO: SEZIONI E CAMPI DI VELOCITA'

- 3 1 Anemometri a mulinello
- 3 2 Anemometri a tubi di Pitot
- 3 3 Anemometri a filo caldo
- 3 4 Metodi di rilievo qualitativo dei campi di velocità

4 CONCETTO DI MISCUGLIO - UMIDITA' ASSOLUTA - UMIDITA' RELATIVA

- 4 1 Metodi di misura dell'umidità relativa
- 4 2 Psicrometro a doppio termometro (a dilatazione o elettrico)
- 4 3 Igrometri ad assorbimento
- 4 4 Apparecchi registratori ed esecutori di comandi

5 CONDIZIONI D'EQUILIBRIO DI SISTEMI ARIA-ACQUA-CORPI POROSI

- 5 1 Concetto di corpo poroso; porosità pervie e impervie; misura della porosità dei corpi
- 5 2 Definizione di contenuti d'acqua in un corpo poroso
- 5 3 Misura del contenuto d'acqua con metodi diretti
- 5 4 Misura del contenuto d'acqua con metodi indiretti (misura di proprietà elettriche, termiche, di assorbimento)

BIBLIOGRAFIASINTESI DEI PRINCIPALI CONTENUTI1 CONCETTI GENERALI

L'esame dello stato di conservazione di un bene culturale richiede ovviamente che siano prese in considerazione tutte le possibili cause di deterioramento: fisiche, chimiche, microbiologiche.

Nelle pagine che seguono ci si limiterà però ad elencare e a trattare brevemente solo le cause fisiche: sia perchè queste, come è stato ripetutamente rilevato, possono in certo modo essere considerate le più significative, venendo ad assumere il carattere di "causa delle cause"; sia perchè, in gran parte dei casi, finiscono per essere rappresentate e determinate fondamentalmente da un numero limitato di grandezze, di cui è in genere semplice eseguire il rilevamento e controllare le variazioni.

Queste grandezze sono quelle che determinano:

- a) le condizioni termiche e igrometriche dell'aria dell'ambiente;
- b) le condizioni termiche del bene culturale e il suo contenuto d'acqua;
- c) l'azione di altre fonti di rifornimento d'acqua a disposizione dell'ambiente e del bene;
- d) il manifestarsi di fatti e condizioni capaci di determinare scambi di energia in qualunque delle forme sotto le quali questa si presenta.

Si tratta in sostanza di quell'insieme di fatti che vengono correntemente indicati come "condizioni ambientali", ai quali perciò può attribuirsi la capacità di influenzare in maniera determinante l'evoluzione dello stato di conservazione dei vari tipi di beni culturali. Pertanto il problema della conservazione, studiato da questo punto di vista, appare abbastanza correttamente ed esattamente definito, e può essere affrontato passando razionalmente per due fasi successive: quella della individuazione delle grandezze scelte per rappresentare le condizioni ambientali, della misura di esse, e della determinazione dei valori più convenienti che queste debbono assumere (determinazione dei requisiti ambientali); e quindi per la fase del progetto degli interventi capaci di far variare le grandezze anzidette secondo le esigenze.

2 METODI DI RILEVAMENTO E MISURA

Comprendono tutte le metodologie e le tecniche di misura delle grandezze fisiche ritenute meglio adatte a rappresentare gli eventi che di volta in volta interessano.

Nei paragrafi che seguono sono riassunte alcune notizie circa le grandezze fisiche che sembra utile considerare, nonché circa i metodi e gli strumenti utilizzabili per la misura di esse.

2 1 Temperatura

Ricordato innanzitutto che la temperatura è una grandezza che non può essere misurata direttamente, ma solo attraverso la misura di uno dei suoi effetti e che, in relazione agli effetti utilizzati, si realizzano diverse classi di termometri (a dilatazione di solidi o liquidi, a variazione di pressione, elettrici, a misura di radiazione), a complemento delle notizie fornite dal prospetto e a miglior chiarimento di esse si aggiungono le considerazioni seguenti. La misura della temperatura dell'aria e in genere dei fluidi, nei campi e con le strumentazioni che interessano ai fini dei problemi di conservazione, non presenta difficoltà apprezzabili. Sono disponibili sul mercato moltissimi tipi di termometri, in linea di principio di affidabilità paragonabile, che si differenziano però per la precisione, per la stabilità nel tempo, per la facilità d'impiego, oltre che per proprietà specifiche legate all'uso (campo di misura, limitato per i termometri a mercurio di buona precisione, più ampio per quelli elettrici; rapidità di risposta, maggiore per quelli elettrici, minore per quelli a dilatazione; dimensioni del corpo termometrico, minimo per quelli a termocoppia; facilità di accoppiamento a sistemi di registrazione o di utilizzazione del segnale per l'esecuzione di un comando).

2 1 1 Temperatura superficiale dei solidi.

La misura della temperatura di una superficie si effettua più frequentemente con termometri elettrici (a termistore o a termocoppia). I tipi a termistore sono meno precisi e

meno stabili nel tempo. Nell'esecuzione della misura occorre assicurare l'efficace contatto fra corpo termometrico e superficie di cui si vuol misurare la temperatura: per i termometri a termistore, in genere atti all'esecuzione di misure istantanee, tutto è affidato all'esperienza e alla sensibilità manuale dell'operatore. Nell'uso delle termocoppie, che, come si è detto, consentono l'esecuzione di misure continue con registrazione e, se occorre, con esecuzione automatica di comandi di regolazione, il problema è risolto in modo soddisfacente per mezzo delle cosiddette "termocoppie a francobollo", che utilizzano un sistema di montaggio su striscia autoadesiva provvista anche di schermatura dalle radiazioni esterne. Il segnale fornito dalla termocoppia (differenza di potenziale proporzionale alla differenza di temperature), si misura con apparecchiature elettriche di tipo potenziometrico.

La misura di temperature superficiali per mezzo di radiometri presenta difficoltà notevoli, dato che il campo di temperature che interessa esplorare è contenuto entro pochissimi decimi di grado intorno allo 0°C.

Questa condizione è favorevole in linea teorica, perché, nel campo di temperature anzidetto, è lecito ritenere che tutti i materiali che qui interessano (metalli compresi) si comportino come corpi grigi e che perciò siano estensibili le leggi del C.N.; ma difficoltà si manifestano perché le potenze radianti, in corrispondenza di quei valori della temperatura, sono estremamente modeste. Esistono, tuttavia, sensori di infrarosso molto delicati e sensibili; ed esistono anche apparecchiature estremamente sofisticate e raffinate (p.e. il sistema "Thermovision") che consentono misure relative (e anche di tipo assoluto pur se in modo meno agevole) di precisione elevata, con un sistema che non solo non richiede di stabilire un contatto materiale con la superficie da esplorare, ma permette addirittura di effettuare la misura anche da notevole distanza (decine di metri).

Per completezza si ricorda che misure di temperature superficiali possono essere effettuate coi metodi dell'olografia ottica (ma operando da distanze modeste dell'ordine di decine di centimetri se si vuol contenere la potenza del laser entro limiti accettabili), nonché con i metodi della fotografia all'infrarosso.

2 2 Umidità Relativa

La misura dell'umidità relativa dell'aria per mezzo dello psicrometro a doppio termometro è sufficientemente agevole e accettabilmente precisa (si apprezza senza difficoltà il 2-3%). E' anche possibile la registrazione delle misure: anzi il registratore a sensore psicrometrico (generalmente costituito da due termometri a resistenza elettrica) può assicurare precisioni di misura fino all'1%; l'apparecchio è però notevolmente costoso e il sensore di esso relativamente delicato e ingombrante.

I diversi tipi di igrometri, a lettura diretta o registratori, sono tutti basati sulla misura di proprietà di materiali igroscopici. Sono sensibilmente meno precisi degli psicrometri e, ciò che è peggio, sono in genere poco stabili nel tempo: sicchè richiedono frequenti operazioni di controllo e di taratura. Infine gli apparecchi del tipo ad appannamento (detti anche a "punto di rugiada"), assai poco diffusi perchè d'impiego delicato e laborioso, hanno qualche pregio principalmente per la buona precisione di misura ottenibile.

2 3 Velocità dell'Aria.

Per quanto riguarda infine la velocità dell'aria, si osserva che gli strumenti disponibili hanno tutti buone qualità e caratteristiche apprezzabili, congrue con la maggior parte delle condizioni di misura che possono verificarsi. Gli strumenti a mulinello sono d'impiego agevole e consentono buone misure di velocità medie in una sezione (esplorando l'intera sezione con il mulinello durante il tempo di misura, si ottiene automaticamente una media ponderata dei valori locali). Gli strumenti a filo caldo e quelli a tubo di Pitot forniscono invece valori locali: essi dovrebbero perciò essere adatti per l'esplorazione dei profili di velocità in determinate sezioni, ma quando queste diventano molto estese o irregolari, quali sono quelle che frequentemente interessano il conservatore d'opere d'arte, le misure diventano estremamente laboriose e, in definitiva, incerte.

Si comincia ora a prendere in considerazione la possibilità di risolvere questo problema di misura facendo ricorso a tecniche Laser.

2 4 Igrometria di Materiali e Strutture

Il problema della misura del contenuto d'acqua in un solido poroso presenta difficoltà gravi d'ordine concettuale, che cominciano a manifestarsi sin da quando si vuol definire con qualche precisione cosa si intende per contenuto d'acqua in un corpo poroso (è solo quella libera contenuta nei pori pervii, o questa più quella raccolta nei pori impervii, o addirittura anche quella di struttura?). Ma anche immaginando di superare questa difficoltà, per esempio attraverso la definizione di precise norme convenzionali, permangono incertezze così gravi da indurre a ritenere questo problema di misura non ancora soddisfacentemente risolto.

Tenute presenti le osservazioni precedenti, perfino il metodo ponderale (basato sulla determinazione della diminuzione di peso che un campione prelevato dal corpo poroso subisce quando viene sottoposto a essiccazione in stufa a 110°C fino al raggiungimento della condizione di peso costante) appare infatti, in principio, criticabile: e non solo perchè è gravemente lesivo dell'integrità del solido che si sta studiando, ma anche perchè i risultati che fornisce possono apparire incerti e scarsamente ripetibili, perchè influenzati dalle modalità seguite nel processo di prelievo del campione e in quello di essiccazione.

Tuttavia deve ritenersi che le indicazioni fornite dai diversi metodi di misura, specialmente se ottenute da uno sperimentatore attento e allenato, risultano utilmente impiegabili. Ciò è tanto più vero quando interessa rilevare (ed è proprio in genere quello che occorre fare) anzichè i valori assoluti dei contenuti d'acqua, quelli relativi, cioè, per esempio, le variazioni nel tempo oppure quelle da zona a zona di una struttura di grandi dimensioni. In questo caso può risultare conveniente l'uso degli strumenti che misurano le variazioni di proprietà elettriche del materiale (in genere resistività) specialmente se, nel caso di misure ripetute periodicamente, si ha cura di non rimuovere gli elementi di misura dal materiale stesso.

Tutti i metodi che qui sotto verranno elencati, se usati con particolare attenzione e prudenza, possono fornire una idea circa il manifestarsi di fenomeni di condensazione su

perficiale, ma non consentono di individuare quando questo importante fenomeno ha inizio. Apparecchiature apposite, proposte relativamente di recente, sono ancora in fase di messa a punto.

Da un punto di vista pratico, le tecniche disponibili per la misura dell'umidità all'interno di materiali e strutture possono essere distinte, naturalmente in maniera convenzionale e non rigorosa, in metodi da laboratorio ("diretti") e metodi "da campo" ("indiretti"). I secondi devono risultare tarabili mediante i primi e, in linea di principio, devono essere operabili senza prelievo di campioni e senza danno alla integrità del materiale esaminato.

Tra i vari metodi, di cui qui sotto si accenna una descrizione, possiamo considerare tra i primi quelli ai punti 2.4.1 1/2/3/4/5/6 e alcune tecniche al punto 2 4 1 7.

2 4 1 Metodi da laboratorio

2 4 1 1 Perdita di peso per essiccamento

La misura consiste, in linea di principio, nel pesare un campione prima e dopo essiccamento. Come già accennato, si tratta di un metodo che, per quanto apparentemente semplice e diretto, può essere affetto da svariati errori sperimentali, dovuti sia ad eventuale incompleta rimozione dell'acqua, sia a cambiamenti chimici o fisici conseguenti al processo di essiccazione.

2 4 1 2 Quantità di vapore acqueo

E' un metodo che permette di ovviare ad alcuni degli errori sperimentali di quello precedente: durante l'essiccazione, il vapore ceduto dal campione viene recuperato, in modo da poter distinguere l'acqua da altre eventuali sostanze volatili.

2 4 1 3 Estrazione di liquidi

Si tratta di una procedura in cui il campione, ridotto in polvere, viene posto in intimo contatto con un liquido capace di assorbire l'acqua. Successivamente, la percentuale di questa che si ritrova nel liquido viene determinata con metodi chimici o fisici. E' necessario, nell'uso di tale metodo, scegliere una sostanza estraente che non possa reagire con altre sostanze costituenti il campione diverse dall'acqua.

2 4 1 4 Reazione chimica

Con questo metodo, l'umidità viene estratta per mezzo di un eccesso di sostanza capace di formare con l'acqua dei prodotti di reazione ben identificabili. Naturalmente, anche in questo caso è necessario che la reazione chimica avvenga solo fra l'acqua e il reagente.

2 4 1 5 Distillazione

Il campione viene posto, insieme a un liquido non miscibile con l'acqua, in un pallone che viene riscaldato fino all'ebollizione. I vapori dell'acqua e del liquido, condensati, vengono raccolti in una provetta graduata: si legge così immediatamente la quantità di acqua raccolta. Si hanno alcuni vantaggi rispetto al 2 4 1 1, tra i quali è notevole la possibilità di usare temperature più basse e una maggiore rapidità, in quanto l'acqua viene rimossa per evaporazione di un mezzo che compenetra bene il campione.

2 4 1 6 Risonanza magnetica nucleare

Si usa uno spettrometro a radiofrequenza per misurare il segnale di risonanza dei nuclei d'idrogeno.

Il campione è posto all'interno di una bobina a radiofrequenza, tra i poli di un elettromagnete da campo. Poiché il segnale dell'idrogeno nei liquidi ha una forma caratteristica, è facile distinguerlo: nascono però difficoltà quando l'acqua

non è l'unico liquido presente, e quando vi è disciolta qual che sostanza solubile contenente idrogeno.

2 4 1 7 Tecniche ottiche

Ve ne sono diverse, tra le quali:

- cambiamento di colore di un mezzo indicatore, prodotto dall'umidità del materiale;
- cambiamento dell'indice di rifrazione di un liquido che abbia assorbito l'umidità del materiale;
- analisi spettroscopica in emissione o assorbimento.

2 4 2 Metodi da campo

2 4 2 1 Metodi di spostamento

Si tratta di procedure da campo, utili per i materiali sciolti. Bisogna conoscere il peso specifico del materiale secco: successivamente, misurando con bilancia e picnometro peso e volume del campione in esame si risale all'acqua contenuta.

2 4 2 2 Misurazioni elettriche

Il metodo si basa sul fatto che generalmente la costante dielettrica e la conduttività di un mezzo variano con il contenuto di umidità. Basta quindi, per un dato materiale, tarare opportunamente la scala di uno strumento.

Per misure di tipo capacitivo, effettuabili in una larghissima banda di frequenze, si può rivolgere l'attenzione sia alla costante dielettrica del mezzo che all'assorbimento della potenza, il che permette di determinare una larga varietà di percentuali dell'acqua contenuta.

2 4 2 3 Assorbimento di potenza di microonde

Il principio è lo stesso su cui si basa il metodo già citato (2 4 2 2) dell'assorbimento di onde a radiofrequenza. Si ha il vantaggio che i risultati sono indipendenti dalla composizione chimica dell'acqua contenuta.

2 4 2 4 Misure con radiazioni nucleari

Consistono nella misura della termalizzazione di neutroni emessi da una opportuna sorgente, che abbiano attraversato uno spessore noto di materiale: si ha così una valutazione della quantità di acqua attraversata.

2 4 2 5 Metodi termici

Possono essere realizzati in vari modi: poichè il calore specifico e la conduttività termica di un materiale variano con il suo contenuto di umidità, i valori di questa possono essere ricavati misurando una delle due suddette grandezze.

Inoltre si può misurare il calore prodotto facendo reagire una sostanza chimica con l'acqua contenuta nel campione, oppure il raffreddamento del campione durante la sua essiccazione.

2 4 2 6 Metodi meccanici

Per molti materiali, le proprietà meccaniche variano con il contenuto di umidità: si può quindi risalire a questo mediante varie misure, dipendentemente dal tipo di materiale e dal suo stato di aggregazione. Ad esempio per i materiali granulati si possono effettuare prove di coesione e di resistenza alla penetrazione. Per i solidi flessibili si può ricorrere alla spremitura. Inoltre si possono sfruttare le variazioni dimensionali di un solido come indice del contenuto d'umidità.

2 5 Strumentazione

Tra le applicazioni dei metodi "indiretti", può essere interessante prendere in esame gli strumenti descritti nel seguito. Come si vedrà, il teleigrometro a filo vibrante è un'applicazione del punto 2 4 2 6, mentre il metodo non stazionario per la conduttività termica e lo psicrometro a termocoppia lo sono per il punto 2 4 2 5. Sono inoltre descritte una metodologia a microonde ed una elettrica, men-

tre non si è trattato il caso delle radiazioni, in quanto pericoloso e sostituibile quasi sempre con un metodo a microonde.

Per quanto riguarda il punto 2 4 2 1, la necessità di prelevare dei campioni da pesare e misurare al picnometro lo rende un metodo distruttivo, anche in considerazione del fatto che la sua utilizzazione come metodo da campo si limita ai materiali sciolti e che pertanto i campioni prelevati dovrebbero essere anche macinati.

2 5 1 Teleigrometro a filo vibrante

E' stato studiato un teleigrometro a filo vibrante, basato sulle variazioni dimensionali subite da materiali igroscopici in fase di assorbimento o di perdita di umidità, e sulla misura di tali deformazioni per mezzo di un filo vibrante, le cui vibrazioni, eccitate da un elettromagnete, hanno una frequenza che è funzione degli sforzi nel filo.

Si elencano caratteristiche e limiti della tecnica:

- a) il campo di applicazione è limitato a umidità relative inferiori alla saturazione;
- b) i risultati ottenibili sono precisi per UR inferiore al 1'80-90%; la precisione si può migliorare sapendo se il fenomeno studiato è inumidimento o essiccazione; la calibrazione è più accurata per piccole variazioni di umidità;
- c) per quanto durevole e stabile nel tempo, il materiale igrometrico finora usato nei teleigrometri (legno) ha lo svantaggio di richiedere una calibrazione individuale per ogni strumento, e di presentare una certa isteresi e lentezza di risposta.

Lo strumento è utile per misure in ambienti ristretti e non ispezionabili a piacere: potrebbe quindi venire impiegato per valutare l'umidità negli strati non superficiali dei suoli, fondazioni, ecc.

2 5 2 Metodo non stazionario per conduttività termica

Il metodo è basato sulla relazione tra umidità contenuta e conduttività termica dei materiali. Una speciale sonda di polietilene contiene 9 termocoppie, essendo la distanza tra due consecutive circa 2 cm. Con l'inserimento della sonda in una struttura si viene così a misurare la conduttività termica in nove punti diversi del materiale. Il sistema consente pertanto di rilevare non solo il contenuto medio di umidità, ma anche la sua distribuzione.

Le misure possono essere ripetute negli stessi punti tante volte quanto necessario per poter seguire eventuali fenomeni di migrazione.

E' stato costruito un apparato che permette di effettuare misure con circa 50 sonde, secondo un programma fissato. Il registratore che è parte di tale apparato è stato dotato di scala logaritmica; di conseguenza le curve temperatura/tempo sono delle rette, essendo la loro tangente una misura della conduttività termica.

Si tratta di un metodo adatto per misurare la distribuzione dell'umidità nelle strutture murarie e le sue migrazioni. Potrebbe quindi essere impiegato per valutare questi fenomeni in muri affrescati e non, soprattutto in quei casi in cui ci sono cause (es. pioggia battente sull'esterno) che possono dar luogo a fenomeni di migrazione dell'umidità.

2 5 3 Assorbimento di microonde

Si tratta di un metodo non distruttivo, in cui il contenuto d'acqua dei solidi porosi non metallici viene determinato misurando l'assorbimento di un fascio di microonde che li attraversa.

Per molti materiali si è trovata una relazione approssimativamente lineare tra il contenuto di acqua (espresso in grammi per cm. della superficie su cui incide il fascio) e l'attenuazione, cioè l'indebolimento del segnale espresso

in decibel; la retta passa per l'origine degli assi o vicino ad essa. La pendenza della curva dipende grandemente dalla lunghezza d'onda usata e in minor misura dalla presenza di sali solubili. A lunghezze d'onda di 3 cm il secondo effetto è trascurabile, ma aumenta progressivamente con la lunghezza d'onda. L'attenuazione tuttavia cala con l'aumentare della lunghezza d'onda; e per H₂O pura essa cade da 40 db/cm a 3 cm, a 1 db/cm a 30 cm.

La quantità d'acqua che può essere misurata è così stabilita dal campo di attenuazione dell'apparato. La massima precisione si ottiene nell'intervallo tra 7 e 40 db; la scelta della lunghezza d'onda si può effettuare portando l'attenuazione fra tali limiti.

Il metodo è elettivo in quei casi in cui interessa il contenuto di umidità di una struttura, a prescindere dalla sua distribuzione in profondità. Come esempio di applicazione, se ne può prevedere l'uso per valutare rapidamente la distribuzione verticale in un muro dell'umidità ascendente dal suolo.

2 5 4 Psicrometro a termocoppia

Si tratta di uno strumento usabile per misurare la pressione relativa del vapor d'acqua in campioni di liquido o materiali porosi, con sensibilità del $\pm 0,002\%$ di UR ad alte umidità.

Tale strumento misura l'effetto combinato del "water-binding" della fase solida e del soluto disciolto nel suolo, e fu sviluppato dal Dipartimento dell'agricoltura degli USA per misurare la disponibilità di acqua nel suolo per la crescita delle piante.

Esprimendo le condizioni energetiche dell'acqua nel suolo in termini di pressione relativa di vapore, si ha il vantaggio di un largo campo di applicabilità del metodo e di poter trattare per mezzo della termodinamica il problema.

Le misure nel terreno sono concordi con le misure

di vapore e correlate direttamente all'acqua legata nella fase solida del suolo. Le maggiori difficoltà sperimentali nelle misure di umidità vicino alla saturazione consistono nel mantenere un preciso controllo della temperatura per il campione. Si può ovviare a ciò con un termostato che mantenga la temperatura costante.

Lo strumento potrebbe essere utilizzato in quei casi in cui avendo un'umidità dei suoli vicina alla saturazione, e non potendo usare lo strumento 2 5 1, interessa porre in relazione le piccole variazioni di questa con le variazioni ambientali, ad esempio, di scantinati o tombe.

2 5 5 Correnti ad alta frequenza

Le misure di umidità per mezzo di correnti ad alta frequenza offrono il vantaggio di poter essere eseguite con elettrodi che non vengano a contatto con il materiale.

Queste misure possono essere fatte con tre metodi:

- a) misure di capacità di un condensatore piano in cui il materiale da misurare agisce come un dielettrico;
- b) misura di resistenza del materiale con correnti ad alta frequenza;
- c) misure di impedenza di un'induttanza in cui il materiale agisce da nucleo.

I tre metodi non sono equivalenti. Il metodo dielettrico è adatto per materiali granulati che possono essere impacchettati; quello della conduttività per materiali solidi e uniformi come il legname; quello dell'induttanza per polveri che possono essere impacchettate. Le varie misure hanno relazioni perfettamente definite tra le caratteristiche fisiche e il contenuto di umidità. La misura della costante dielettrica per esempio, dà la somma dei movimenti delle molecole di acqua, dipende dall'energia di legame di questa e non è influenzata dal suo contenuto in sali. La misura della conduttività elettrica deve essere tarata in relazione al materiale in esame.

Come si vede, non si tratta di uno specifico strumento, ma bensì di un gruppo di metodologie molto versatili. Le possibilità di applicazione sono notevoli: dal contenuto di acqua in manufatti lignei alle misure su carta, tele, murature.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- 1) U. BORDONI Fondamenti di fisica tecnica, Zanichelli, Bologna, 1950
- 2) R. OBERT - R. GAGGIOLI Thermodynamics, Mc Graw-Hill, San Francisco, 1963
- 3) M. ZEMANSKY Heat and thermodynamics, Mc Graw-Hill, San Francisco, 1957
- 4) E. CARLEVARO Fisica tecnica: 2° aerodinamica, Liguori, Napoli, 1968
- 5) G. DE CASTRO Hygrometric method of measuring moisture contents in porous materials, by "Humidity and moisture", vol. IV, pp. 7-12 of A. Wexler, Reinhold publishing corporation, New York, 1965
- 6) M. A. RICHARDS A thermocouple psychrometer for measuring the relative vapor pressure of water in liquids or porous materials, *ibid* pp. 13-18
- 7) A. H. VOS Non-steady-state method for the determination of moisture content in structures, *ibid* pp. 35-48
- 8) H. L. WATSON Measurement and control of moisture content by microwave absorption, *ibid* pp. 87-94
- 9) F. J. HUGHES - J. L. VAALA and R.B. KOCK Improvement of moisture determination by capacitance measurement through density correction, *ibid* pp. 95-98
- 10) R. P. LEROY Moisture measurement by high-frequency currents, *ibid* pp. 135-140
- 11) W. L. ROLLWITZ Nuclear magnetic resonance as a technique for measuring moisture in liquids and solids, *ibid* pp. 149-162

4 COMPOSIZIONE MOTO E EFFETTI
DELLE POLVERI

T. Tampieri

I N D I C E A N A L I T I C O

- 1 MECCANISMI DI TRASPORTO DEL MATERIALE PARTICELLATO E DEPOSIZIONE SU SUPERFICI VARIAMENTE ORIENTATE
- 1 1 Dinamica del materiale particellato in aria.
- 1 1 1 Distinzione in intervalli dimensionali dello spettro dei diametri delle particelle ed individuazione dei meccanismi caratteristici di trasporto per i vari intervalli
- 1 1 2 Diffusione browniana
- 1 1 3 Moto inerziale: sedimentazione gravitazionale
- 1 1 4 Moto inerziale: trascinamento da flussi d'aria in funzione della velocità e di altri parametri caratteristici
- 1 1 5 Diffusione turbolenta
- 1 2 Definizione dei meccanismi di trasporto presso pareti
- 1 2 1 Effetti dovuti al gradiente di velocità dell'aria in regime laminare
- 1 2 2 Gradiente di turbolenza presso la parete
- 1 2 3 Forze foretiche:
 - termoforesi dovuta a gradienti di temperatura tra pareti ed aria ambiente;
 - diffusioforesi e flusso di Stefan generati da superfici evaporanti o condensanti vapore acqueo;
 - effetti delle superfici evaporanti sul moto delle particelle in regime turbolento.
- 1 2 4 Attaccamento alle pareti
- 1 2 5 Fenomeni di "reentrainment"
- 1 3 Definizione dei modelli di deposizione su pareti in diversi regimi
- 1 3 1 Velocità di deposizione in regime laminare
- 1 3 2 Velocità di deposizione in regime turbolento

2 CAMPIONAMENTO E ANALISI

2 1 Strumenti di campionamento e analisi

2 1 1 Campionamento del materiale in aria (determinazione della concentrazione di materiale particellato)

2 1 2 Validità e limiti delle misure di concentrazione in aria

2 2 Campionamento del materiale sulle pareti

2 2 1 Determinazione dei tempi di permanenza delle polveri sulle pareti; ciclo temporale delle polveri

2 3 Controllo delle condizioni dinamiche dell'aria e delle caratteristiche delle pareti (in funzione dell'applicazione dei modelli di deposizione precedentemente formulati)

3 EFFETTI DELLE POLVERI SUI MATERIALI

3 1 Meccanismi di deterioramento

3 1 1 Fattori influenzanti il deterioramento

3 2 Alcune caratteristiche del deterioramento dei materiali antichi

3 3 Metodi di prevenzione

3 3 1 Sistemi per l'abbattimento delle polveri

3 3 2 Trattamenti preventivi dei materiali

3 3 3 Sistemi di rimozione

BIBLIOGRAFIA

SINTESI DEI PRINCIPALI CONTENUTI

1 CARATTERISTICHE GENERALI DEGLI AEROSOL

Sistemi di particelle solide o liquide disperse in un gas sono chiamati aerosol. Ai fini dello studio presente interessano principalmente gli aerosol con fase dispersa solida. Tuttavia occorre ricordare che, al crescere dell'umidità dell'aria le particelle si comportano come nuclei di condensazione di acqua: con la condensazione le dimensioni e le proprietà fisiche cambiano, e il processo conduce ultimamente al generarsi di goccioline d'acqua.

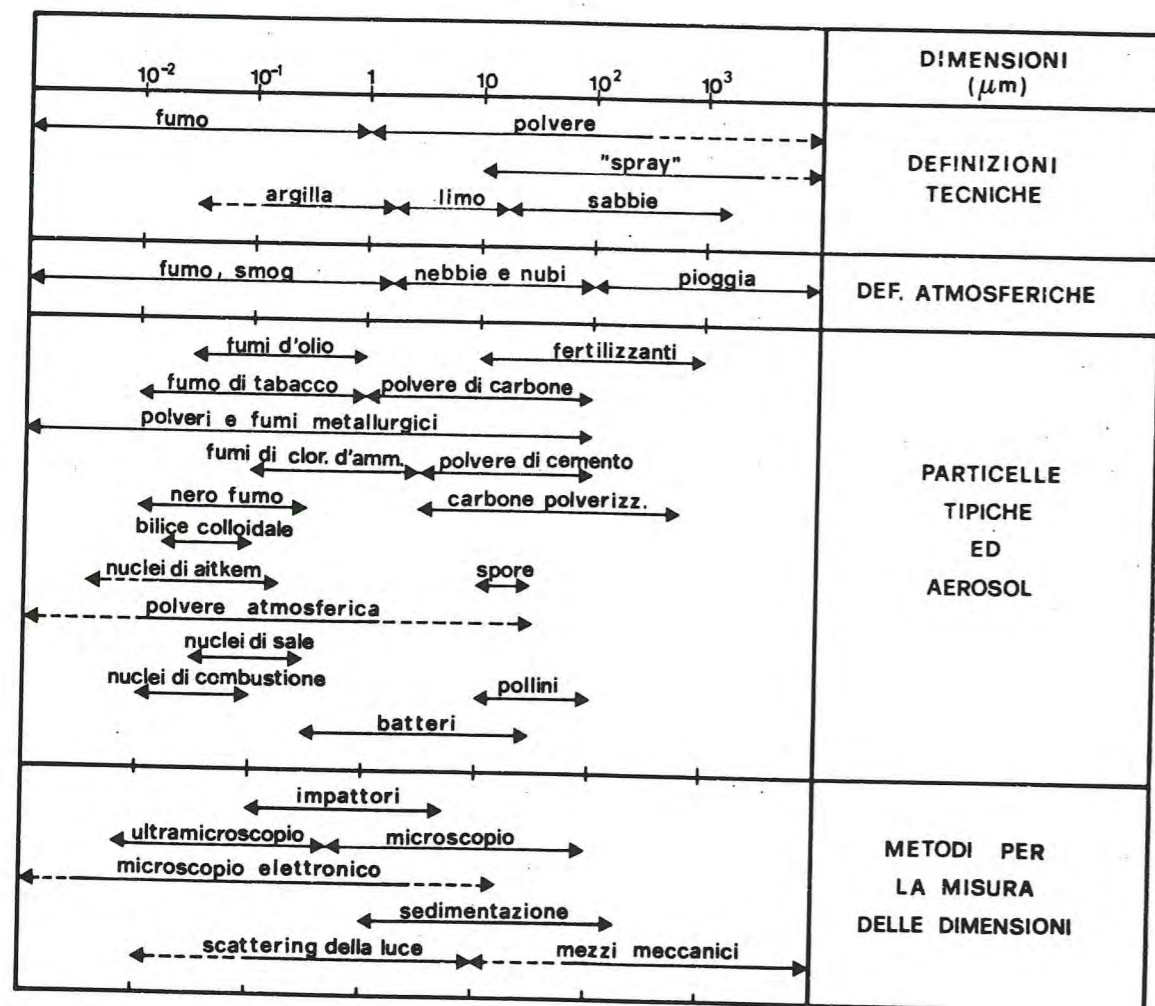
Dispersioni di particelle solide in aria sono spesso chiamate polveri, indipendentemente dalle dimensioni. Aerosol ottenuti per condensazione sono le nebbie e i fumi; tra questi ultimi i più importanti sono quelli formati durante la combustione. Si possono avere fumi di materiali igroscopici, così che le particelle possono essere solide, semiliquide o liquide in relazione all'umidità dell'aria.

Costituenti non trascurabili degli aerosol nelle zone continentali sono anche i pollini e le spore vegetali. Da un punto di vista fisico sono generalmente assimilabili a qualsiasi altra particella inorganica; non si può dire sempre la stessa cosa per quanto riguarda la loro azione sulle superfici ove si depositano.

Nella tabella 1 è riassunta un pò di nomenclatura relativa agli aerosol e ai metodi di studio, in funzione delle dimensioni.

Con la parola aerosol si indicano quindi sistemi con particelle in un ampio spettro di dimensioni, indicativamente da 10^{-7} a 10^{-1} cm. Non deve sorprendere il fatto che nel passaggio dal limite inferiore a quello superiore si assista a grandi cambiamenti di proprietà fisiche, e in particolare a variazioni delle leggi che governano il moto delle particelle. In linea di massima, i cambiamenti più rilevanti avvengono per dimensioni delle particelle tra 10^{-5} e 10^{-4} cm, almeno parzialmente in relazione al fatto che il cammino libero medio delle molecole d'aria in condizioni ambiente è circa 10^{-5} cm.

L'esistenza di questa regione di transizione autorizza a classificare le particelle di aerosol in tre gruppi.



Tab.-Caratteristiche e metodi di studio del materiale particellato in funzione delle dimensioni.

Le più piccole, con raggio inferiore a 10^{-5} cm, sono caratterizzate da una legge di resistenza al moto proporzionale al quadrato del raggio; per tali particelle la diffusione browniana è il meccanismo predominante di trasporto. Sono invisibili al microscopio ottico, e sono spesso dette genericamente nuclei di Aitken. Un secondo gruppo, nuclei giganti secondo la letteratura, è costituito da particelle con raggio maggiore di 10^{-4} cm, convenientemente analizzabili al microscopio ottico. Per queste particelle la legge di resistenza è proporzionale al raggio; la sedimentazione gravitazionale prevale nettamente sulla diffusione browniana. Infine, è utile porre i sistemi con particelle di raggio intermedio tra 10^{-5} e 10^{-4} cm in un gruppo speciale di aerosol con caratteristiche di transizione. Le particelle, dette nuclei grandi, sono analizzabili con le tecniche della ultramicroscopia, e predominano negli aerosol di condensazione formati da sostanze con bassa tensione di vapore.

Per le applicazioni è anche importante determinare la funzione di distribuzione di dimensioni delle particelle di un aerosol. È chiaro anche da questi brevi cenni che differenti metodi di studio sono necessari per determinare simultaneamente la distribuzione sull'intero spettro di dimensioni che un aerosol può presentare. La letteratura fornisce però alcuni modelli di distribuzioni per vari tipi di aerosol (marittimi, continentali, misti) che possono essere assunti come base di partenza per molte ricerche di carattere applicativo. Misure accurate di concentrazione ed eventualmente di distribuzione possono essere condotte nei campi di dimensioni che di volta in volta si possono individuare come più importanti per una certa applicazione.

La forma delle particelle di aerosol è una caratteristica che merita di essere brevemente analizzata. Le goccioline mostrano ovviamente una forma sferica; per particelle solide invece la variabilità delle forme è molto grande, ed occorre inoltre distinguere tra particelle primarie ed aggregati. Nei fumi le particelle primarie possono essere cristalline, o sferiche (spesso in funzione della composizione chimica e in dipendenza dall'umidità dell'aria), e così piccole da richiedere il microscopio elettronico per lo studio delle forme. Le particelle di polvere sono in genere di forma irregolare, essendo di solito frammenti dei corpi solidi, la cui natura cristallina tuttavia si rende spesso e

vidente nelle forme, per esempio lamellari o fibrose, delle particelle stesse.

Gli aggregati negli aerosol hanno essenzialmente origine dalla coagulazione di particelle individuali di fumo o polveri. Il tasso di coagulazione di aerosol di concentrazione data cresce rapidamente al decrescere delle dimensioni delle particelle primarie, anche la stabilità degli aggregati e la loro capacità di resistere alla azione disgregatrice della turbolenza è maggiore se le particelle primarie sono piccole. Come regola, i sistemi derivanti da particelle altamente disperse consistono principalmente di aggregati e contengono raramente particelle singole.

La coagulazione comporta, globalmente, un flusso di materia dalla regione delle particelle più piccole verso quella delle più grosse. Si può vedere (Junge, 1963) che particelle isolate più piccole di $5 \cdot 10^{-7}$ cm possono esistere solo per brevi periodi di tempo; quindi il limite inferiore di dimensioni delle particelle di un aerosol è determinato dalla coagulazione.

L'altro estremo dello spettro dimensionale è determinato dalla sedimentazione. Il raggio di $2 \cdot 10^{-3}$ cm può essere considerato un valore mediamente rappresentativo del limite superiore di dimensioni di un aerosol troposferico. Questo limite dipende tuttavia fortemente dalle condizioni meteorologiche, essenzialmente dalla turbolenza dell'aria, e soprattutto fortemente dalla eventuale presenza di sorgenti prossime alla località in studio. Particelle di dimensioni superiori a 10^{-2} cm si possono avere, anche se in concentrazioni estremamente basse, nello strato d'aria prossimo al suolo, generate dalla disgregazione del suolo stesso e trascinate in aria dal vento.

2 SORGENTI DI MATERIALE PARTICELLATO

Molteplici sono le sorgenti del materiale particellato che si ritrova sotto forma di aerosol atmosferici; possono essere viste, nell'ottica di questa ricerca, come sorgenti di inquinanti che, depositandosi sulle superfici interne ed esterne delle strutture, ne possono altera-

re le caratteristiche. Un breve esame di queste possibili sorgenti non esula dal presente lavoro, e deve essere fatto per individuare e classificare correttamente i tipi di materiale che possono provocare alterazioni di varia natura.

Una suddivisione di massima si può fare in sorgenti naturali e generate da interventi ed attività umane; tra queste ultime occorrerà distinguere tra attività di tipo rurale ed attività industriali od urbane.

2 1 Sorgenti naturali organiche

I pollini liberati da piante di vario genere, le spore, i funghi e i batteri sono frequenti, con variazioni stagionali, nell'atmosfera. I grani di polline hanno dimensioni in genere tra 10 e 50 μ m, ma se ne possono trovare anche di più piccoli. Possono essere trasportati a grande distanza dal luogo di origine, essenzialmente in funzione delle condizioni di vento dell'atmosfera.

La quantità di grani di polline presenti nell'atmosfera può essere ricavata analizzando campioni d'aria, con gli stessi strumenti utilizzati per l'analisi del materiale inorganico. Si presentano variazioni di concentrazione in funzione di parametri meteorologici quali la temperatura e l'umidità dell'aria, l'insolazione, la velocità del vento. Sembra che l'effetto di essiccamento dovuto ad un aumento della temperatura in relazione alla influenza della radiazione solare incrementi la liberazione di pollini più di altri fattori.

Caratteristica importante dei materiali organici è il loro decadimento (ossidazione delle proteine) in ambiente ricco di ossigeno, e la putrefazione in condizioni anaerobiche. Durante questi processi si liberano sostanze chimiche che possono avere una certa importanza in alcuni processi di degradazione dei materiali.

2 2 Nuclei di condensazione

Sotto questo termine piuttosto generico sono comprese moltissime particelle, aventi varia origine, che es-

sendo in genere presenti nella troposfera, costituiscono usualmente nuclei di condensazione per l'acqua.

Le principali sorgenti naturali di nuclei di condensazione sono il mare, le combustioni, ed altri fenomeni di minore interesse in questa sede, come per esempio le eruzioni vulcaniche e la polvere meteorica. I materiali prodotti da queste sorgenti sono presenti generalmente in concentrazione molto bassa, assai variabile da luogo a luogo. L'analisi chimica mostra che i principali costituenti sono i solfati, i cloruri, i nitrati e l'ammoniaca.

Le goccioline che dalla superficie del mare vengono proiettate in aria, attraverso vari processi meccanici, costituiscono il cosiddetto "spray" marino. L'evaporazione di queste goccioline comporta che nell'atmosfera rimangono cristallini di sali, la cui composizione riflette il contenuto salino del mare. Questi nuclei di sale costituiscono la componente fondamentale del tipico aerosol di origine marina. Lo spettro dimensionale va da 0.1 a qualche micron; costituiscono ottimi nuclei di condensazione e possono venire trovati anche a grande distanza dai mari. (Occorre tuttavia precisare che nelle zone continentali le particelle di sale di origine marina si mescolano con altre prodotte localmente da sorgenti industriali, e distinguere le diverse origini diventa sostanzialmente impossibile).

I fuochi risultanti da cause naturali aumentano il contenuto di fumi e di altri prodotti di combustione nell'atmosfera. Particolarmente in certe regioni durante la stagione estiva non sono infrequenti incendi di boschi od altra copertura vegetale del suolo. Tuttavia si può assumere che questi fatti abbiano carattere occasionale (se si prescindono dai fuochi accesi durante certi lavori agricoli di preparazione del terreno) e comunque i prodotti non comportano caratteristiche molto diverse da quanto si verifica per i fumi di origine urbana ed industriale.

2 3 Polveri continentali

In linea di massima gli aerosol di natura continentale hanno origini diverse e non tutte ben note. Le loro caratteristiche chimiche sono legate alla composizione minerale

logica dei suoli, se si tratta di particelle derivanti dal terreno e portate in sospensione dai movimenti dell'aria, e al materiale rilasciato da impianti industriali o sorgenti urbane, se si tratta di particelle generate da attività non agricole dell'uomo.

Il suolo è una sorgente rilevante di materiale particellato, particolarmente in periodi o climi asciutti e in presenza di forti venti (si veda ad esempio un lavoro recente di Sehmel e Lloyd, 1973). Gli aerosol così generati possono occasionalmente essere in concentrazione rilevante e venire trasportati a grande distanza dal luogo di origine.

Le polveri possono sollevarsi per cause del tutto naturali (abrasione eolica) od essere generate da processi di dissodamento del suolo, o analoghe attività rurali. Le dimensioni delle particelle sono molto varie (da 0.1 a 300 μm , indicativamente) in dipendenza dai fattori che le hanno generate e dall'intensità del vento che le trasporta. In casi particolari, nubi di polvere possono diventare molto importanti nel bilancio di una atmosfera inquinata. In genere, mentre le più piccole contribuiscono alla costituzione dell'aerosol continentale, e fungono da nuclei di condensazione, le più grandi hanno importanza solo presso la sorgente. Riguardo al problema che interessa attualmente, occorre rilevare che tali particelle, specialmente le più grosse, possono provocare per esempio fenomeni di abrasione eolica.

Occorre anche rilevare in questo contesto che materiale particellato può andare in sospensione a causa di movimenti d'aria risultanti dalle attività umane. Il moto di veicoli a velocità sostenuta contribuisce a problemi locali di inquinazione atmosferica in misura più o meno rilevante a seconda delle condizioni locali (tipo di clima e stato delle strade). Traffico intenso su strade bianche o aree di parcheggio può causare enormi quantità di polvere. Ancora, a titolo di esempio, si può ricordare che è stato stimato, alcuni anni fa, che a Los Angeles si liberano quotidianamente 50 tonnellate di gomma di pneumatici sotto forma di particelle. Se anche solo una piccola parte di queste rimane in sospensione nell'aria, certamente costituisce una parte non trascurabile della quantità totale di materiale particellato che inquinava l'atmosfera.

Gli impianti industriali costituiscono una rilevante sorgente di materiale particellato di varia natura, in funzione delle specifiche lavorazioni che vengono effettuate. È ben nota la gravità dell'inquinamento presso le sorgenti, anche a grande distanza particelle abbastanza piccole possono diventare di importanza rilevante. Appare superfluo discutere di questi fatti, che sono noti nelle loro linee generali, anche se spesso si richiederebbero analisi più approfondite di quanto si faccia generalmente nello studio della loro propagazione e dei loro effetti. Fornaci ed incineratori, industrie metallurgiche e manifatturiere, raffinerie, motori a combustione costituiscono tutte sorgenti potenziali ed effettive di materiale particellato di varia natura. Occorrerà solo sottolineare che tale materiale, e in special modo le componenti metalliche finemente suddivise, può diventare assai importante come catalizzatore di reazioni chimiche sulla superficie su cui si deposita, modificando e a volte aggravando notevolmente i processi di deterioramento in atto.

3 IL MATERIALE PARTICELLATO NELL'ATMOSFERA INQUINATA

Per concludere questa introduzione, occorre dare qualche cenno sulle concentrazioni di materiale particellato inquinante nella atmosfera, e sulle loro variazioni in funzione delle condizioni meteorologiche e della distanza dalle sorgenti.

La definizione di atmosfera inquinata è largamente arbitraria, e usualmente basata su certi standard di concentrazione stabiliti dalle autorità competenti. Queste concentrazioni sono generalmente alte rispetto al valore di fondo (materiale comunque presente nell'atmosfera, per cause naturali). Per quanto concerne la ricerca in progetto, occorre considerare essenzialmente le polveri e i fumi. Altri componenti, gassosi, avranno rilevante importanza nello studio delle alterazioni chimiche, e saranno trattati adeguatamente altrove.

La concentrazione totale di materiale particellato in atmosfere inquinate è più alto del fondo naturale da 10 a 100 volte. Valori medi per grandi regioni industriali negli USA potevano variare, anni fa, da 200 ad 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con valori massimi fino a 10 volte superiori; per città piccole

da 100 a 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Si può ricordare che il quantitativo totale di aerosol naturale, tenendo conto anche delle particelle di sale marino, usualmente varia da 5 a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dalle analisi chimiche si vede che una frazione considerevole, cioè il 70 od 80 % del totale, è costituita da materiale insolubile, e contiene composti minerali ed organici (prodotti di combustione). La frazione solubile è in genere ricca di solfati. Si rileva anche, ovviamente, la presenza di composti (per esempio del piombo e dello zinco) specifici della polluzione industriale, accanto ad altri (composti del silicio, del calcio, dell'alluminio, del ferro, ecc.) anche abbondanti nella polvere naturale, e non specifici di attività umane.

Buona parte del materiale rilasciato da impianti od altre sorgenti artificiali non si deposita in una ristretta regione attorno alla sorgente, ma è rimosso dall'aria. La concentrazione di particelle (e gas) nelle aree inquinate mostra variazioni giornaliere, settimanali e stagionali. Queste variazioni sono il risultato dell'interazione tra il tasso di produzione e quello di deposizione e dispersione, essendo quest'ultimo fattore legato in modo complesso alla topografia ed alle condizioni meteorologiche. La produzione di parecchi inquinanti ha un minimo durante la notte, una rapida crescita nel primo mattino in coincidenza con l'inizio del traffico e la ripresa di molte attività industriali, e un calo serale. Sovrapposta a questo ciclo di produzione c'è la variazione del tasso di dispersione dovuta alla ventilazione naturale della atmosfera. Questa ventilazione dipende in modo complesso dalla velocità orizzontale del vento e dal mescolamento convettivo e turbolento; quest'ultimo fattore è a sua volta controllato dalla velocità del vento, dalla topografia e dalla struttura termica dei livelli bassi dell'atmosfera. Pertanto un attento studio dei fenomeni meteorologici è necessario per ottenere informazioni esaurienti sull'intensità locale della polluzione e sull'estensione della regione interessata, attorno ad un'area di sorgenti inquinanti.

4 DINAMICA DEL MATERIALE PARTICELLATO IN ARIA

Qui di seguito si intendono delineare alcuni meccanismi tipici del moto di particelle nell'atmosfera, con particolare riguardo al problema in esame. Senza pretendere la com-

pletezza, si indicheranno le linee essenziali dei processi fisici che entrano in gioco nel meccanismo di deposizione secca, cioè di deposizione su superfici causata dalle proprietà di moto delle particelle e dell'aria (trascurando il trascinarsi di particelle catturate da goccioline di acqua).

4 1 Trascinamento dell'aria e sedimentazione

Per particelle con raggio r maggiore del cammino libero medio delle molecole d'aria (circa 10^{-5} cm in condizioni ambiente) la resistenza dell'aria al moto delle particelle è data dalla legge di Stokes

$$F = -6\pi\eta rV$$

essendo V la velocità delle particelle rispetto all'aria ed η la viscosità dinamica dell'aria. Questa relazione è utilizzabile, con un errore inferiore al 10%, nell'intervallo di raggi da 1 a 35 μm . Per particelle più piccole o più grandi occorre introdurre opportune correzioni (Fuchs, 1964).

Due importanti considerazioni si possono fare su questa relazione. La prima è che in un fluido in moto, senza altre forze esterne, la particella viene trascinata con la stessa velocità del fluido; la seconda è che la velocità di sedimentazione gravitazionale è espressa dalla

$$V_g = (2/9\eta) r^2 \rho g$$

essendo g l'accelerazione di gravità e ρ la densità della particella. La dipendenza dal quadrato del raggio della velocità di sedimentazione significa che tale velocità è sensibile solo per particelle abbastanza grandi, mentre per le più piccole altri fenomeni hanno maggior peso nel fenomeno del trasporto.

Studi recenti hanno approfondito diversi aspetti relativi alla velocità di sedimentazione gravitazionale di particelle di varia forma (anche di origine organica). Si veda ad esempio il lavoro di Locatelli e Hobbs (1974).

4 2 Termoforesi, diffusioforesi e flusso di Stefan

Si indica col termine di forza termoforetica la forza che viene esercitata su una particella immersa in un gas in cui sia mantenuto un gradiente di temperatura. Tale forza è diretta nel verso opposto al gradiente termico, ed è generata dalla differenza di quantità di moto trasferita dalle molecole del gas alla particella. Si può mostrare che tale forza è direttamente proporzionale al gradiente di temperatura e dipende dal quadrato del raggio della particella: questo significa che la velocità risultante è indipendente dalle dimensioni. La forma esplicita della forza termoforetica dipende dal rapporto tra le dimensioni della particella e il cammino libero medio del gas; si danno varie espressioni nei vari intervalli di raggio. Per una discussione approfondita, si può vedere Waldmann e Schmitt, in *Aerosol Science* (1966).

La termoforesi può assumere un ruolo rilevante nella deposizione di piccolissime particelle di polvere su superfici più fredde dell'aria, in ambienti chiusi (aria stazionaria o al più in moto laminare). Su questo principio si basano alcuni strumenti di cattura di particelle (termoprecipitatori).

Quando una superficie evapora o condensa, le particelle eventualmente sospese nell'aria attorno sono soggette a diverse forze. Il caso che maggiormente interessa è quello della condensazione di vapor d'acqua presente nell'aria su una superficie più fredda: questo si verifica per superfici murarie, la cui temperatura tende a rimanere più bassa di quella ambiente. In questo caso si verifica un moto idrodinamico del fluido (aria più vapor d'acqua) verso la parete condensante, con una velocità proporzionale al gradiente di vapore d'acqua. Si indica tale velocità col nome di velocità di Stefan: essa rappresenta la velocità con cui approssimativamente le particelle vengono trascinate verso la parete. Inoltre, a causa della differenza di massa tra le molecole di vapore d'acqua e quelle di azoto e di ossigeno dell'aria, si ha una forza su ogni particella sospesa, originata dalla differenza di quantità di moto trasferita alla particella dalle diverse molecole. La velocità che ne risulta dipende ancora solo dal gradiente di concentrazione di vapore (o che è lo stesso di aria secca) e comporta una correzione, piccola, alla velocità di Stefan.

E' inutile dire che il caso di una superficie evaporante, che pure si può presentare, è del tutto analogo, comportando solo un cambiamento di segno delle varie velocità in gioco.

Questi fenomeni legati alla diffusione di vapore in aria possono avere, come si è già accennato, rilevante importanza nella deposizione delle particelle, in condizioni analoghe a quelle citate per la termoforesi, e spesso in sinergismo con questa.

Un'ampia discussione di questi fenomeni si trova in Waldmann e Schmitt, già citati, in Goldsmith et al. (1963), e in Goldsmith e May, in Aerosol Science (1966).

4 3 Diffusione browniana

La teoria del moto browniano è stata ampiamente trattata, a partire da Einstein; di essa interessa qui ricordare essenzialmente che si tratta di un meccanismo di importanza assai rilevante nella deposizione di materiale particellato su superfici solide (o liquide). In effetti, una superficie solida è in grado di catturare particelle (nel senso che le particelle depositate in genere non se ne staccano: vedi anche il paragrafo 5 2 dedicato all'adesione sulle pareti) e quindi tra la parete e l'aria si instaura comunque un gradiente di concentrazione di particelle, e quindi un flusso verso la parete. Per particelle abbastanza piccole il coefficiente di diffusione browniano è rilevante: questo significa che si instaura un flusso sensibile di particelle verso la parete. Questo meccanismo può rendere ragione (particolarmente in regime laminare) della quantità di polvere che si deposita su superfici verticali o su soffitti.

4 4 Diffusione turbolenta

Il regime turbolento si instaura in un gas quando le forze inerziali prevalgono su quelle viscosi. In queste condizioni il moto delle particelle viene fortemente modificato rispetto al caso laminare; in funzione delle dimensioni gli effetti sulla deposizione saranno molto diversi. Del problema in senso globale si parlerà più avanti; qui inte-

ressa piuttosto notare che il fenomeno della diffusione risulta notevolmente accentuato, poichè l'energico rimescolamento dell'aria comporta più alti coefficienti di diffusione ed anche più intensi gradienti presso la parete.

Lo studio della diffusione turbolenta di particelle richiede la conoscenza del relativo coefficiente di diffusione. Tale coefficiente è stato determinato sperimentalmente da vari autori per tunnel a vento (si veda per esempio Laufer, 1954), mentre per la atmosfera libera non esistono dati che si possano considerare veramente definitivi, ad avviso di chi scrive. La difficoltà sorge ovviamente sia a causa delle complesse condizioni sperimentali, sia dalla quantità di parametri (meteorologici, topografici) da cui tale coefficiente risulta dipendere. In merito, un lavoro classico è il libro di Pasquill (1962); dello stesso autore è stato pubblicato di recente (1971) un lavoro che fa il punto su diversi problemi in questo campo. Lavori specialistici sull'argomento sono innumerevoli, e il modo di affrontare il problema estremamente vario; uno studio interessante è per esempio quello di Csanady (1963).

5 DEPOSIZIONE DELLE PARTICELLE

I meccanismi che governano il moto delle particelle, delineati nei paragrafi precedenti, sono quelli che determinano essenzialmente anche la loro deposizione secca. Con deposizione secca si intende quell'insieme di fenomeni che comporta come risultato finale un flusso di particelle dall'aria verso superfici solide, e conseguentemente un accumulo su queste ultime. (In realtà si possono dire le stesse cose anche per superfici liquide, come per esempio, il mare; ma ora questo non interessa). Studi su questi argomenti sono stati di recente molto sviluppati, in quanto il campo di applicazione è estremamente vasto: dall'arricchimento in particelle di goccioline d'acqua entro una nube all'accumulo di materiale particellato nell'apparato respiratorio dell'uomo.

Anche il caso attualmente in studio rientra nella ottica qui indicata. Una breve analisi del complesso dei fenomeni già singolarmente delineati in precedenza e qualche riferimento alla letteratura potranno servire per lo sviluppo della ricerca.

5 1 Meccanismo della deposizione secca

Conviene analizzare i diversi tipi di fenomeni in base alle dimensioni delle particelle. Per le particelle più piccole, diciamo attorno a $0.1 \mu\text{m}$ o inferiori, il meccanismo di moto prevalente è quello diffusivo. La diffusione browniana e quella turbolenta (se il regime è turbolento) si sommano, mentre gli effetti inerziali risultano del tutto trascurabili. La sedimentazione gravitazionale non ha sostanzialmente luogo per queste particelle. Pertanto a questo spettro di dimensioni appartengono le particelle che possono depositarsi su superfici comunque orientate, e in qualsiasi regime di aria. Una equazione di diffusione è sufficiente per descriverne il comportamento; la parete costituisce sempre per particelle di questo genere un "pozzo perfetto", cioè le particelle una volta attaccate non se ne distaccano più, il coefficiente di diffusione turbolento non è noto in generale; Sehmel (1973a) fornisce dei valori di diffusività delle particelle calcolati in tunnel a vento; mentre valori relativi all'atmosfera libera si ricavano da Pasquill e da lavori successivi. Tra i due estremi si collocherà in generale il caso in studio.

Nel campo delle particelle più grosse ($20 \mu\text{m}$ ed oltre) valgono considerazioni opposte. Qui la velocità di sedimentazione gravitazionale prevale su ogni altro fenomeno di deposizione quando il fluido è fermo; se il fluido è in moto le caratteristiche inerziali delle particelle portano a una notevole deposizione su quelle superfici presso cui si hanno brusche variazioni della velocità del fluido (impatto). Il regime turbolento ha ancora influenza sulla deposizione: non più attraverso meccanismi diffusivi, che sono sostanzialmente inefficaci, ma per la modifica a cui sono soggette le velocità delle particelle contenute nei vortici.

Per le particelle di dimensioni intermedie, da $5 \cdot 10^{-1}$ a $10 \mu\text{m}$, valgono in varia misura tutte le considerazioni finora fatte. Il coefficiente di deposizione turbolenta prevale su quello browniano, ma non è sufficiente a spiegare l'entità dei flussi depositantisi. In effetti, le caratteristiche inerziali hanno un peso crescente per queste particelle, e l'accoppiamento che risulta con i vortici turbolenti fa sì che per queste particelle la differenza di deposizione in regimi laminari e turbolenti sia marcata. In

genere la deposizione può venire descritta per mezzo di equazioni di diffusione, a cui viene aggiunto un termine convettivo. Si può vedere in Sehmel (1973a) una analisi della deposizione nei tubi, effettuata introducendo modifiche al coefficiente di diffusione per tener conto degli effetti inerziali della turbolenza. Un modello diverso, elaborato anche da chi scrive, introduce un termine convettivo più complesso per spiegare i valori della deposizione in regime turbolento (Caporali et al., 1975a).

Nelle figure 1 e 2 sono riportati alcuni risultati che mostrano l'andamento del flusso di materiale depositato su una parete, normalizzato alla concentrazione in aria, e per diverse densità delle particelle, in funzione delle dimensioni, per diversi regimi di turbolenza entro tunnel a vento.

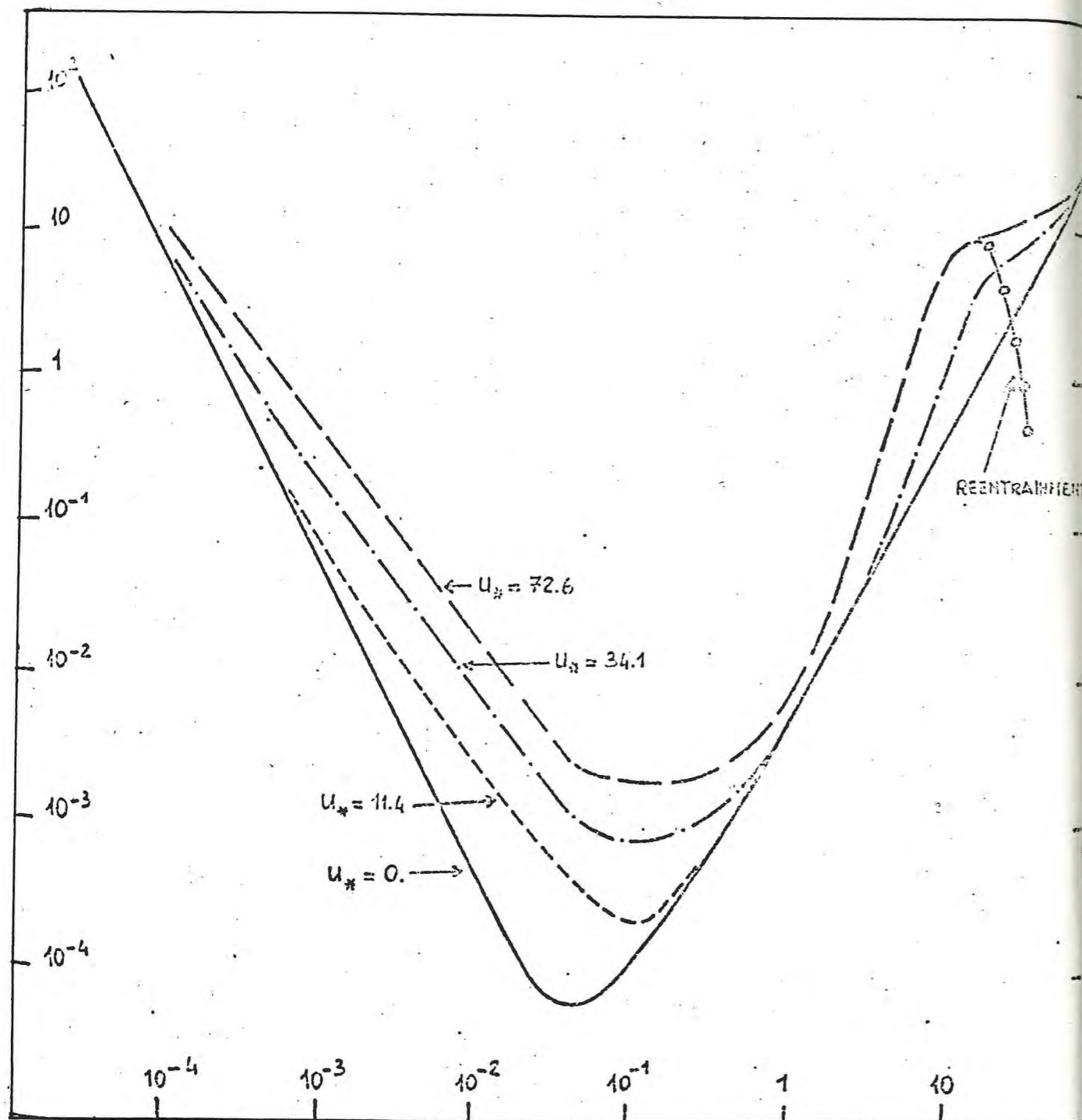
5 2 Effetto delle superfici

L'effetto delle superfici sui meccanismi di raccolta delle particelle si esplica generalmente in due modi diversi. Le caratteristiche di porosità e di irregolarità geometriche della parete hanno un ruolo importante sulle capacità della parete stessa di raccogliere e trattenere in diversa misura le particelle trasportate dall'aria. Inoltre, il fatto che sulla superficie sia in atto un fenomeno di evaporazione o condensazione dell'acqua, può influenzare sensibilmente il moto delle particelle presso la parete, e pertanto la loro deposizione.

L'influenza delle irregolarità delle superfici si manifesta in genere nello studio della deposizione in regime turbolento, con sensibile aumento del flusso rispetto a quanto avviene su superfici lisce. In questo caso infatti le irregolarità della superficie modificando in qualche modo lo spettro della turbolenza locale aumentano sostanzialmente il coefficiente di scambio tra aria e parete. Dati recenti relativi al confronto tra superfici lisce e ruvide si trovano in Clough (1973); un altro studio è presentato da Browne (1973).

Il tipo di superficie (liscia o ruvida) può anche determinare un minore o maggiore attaccamento delle particelle. Specialmente per le più grosse si può verificare, ad

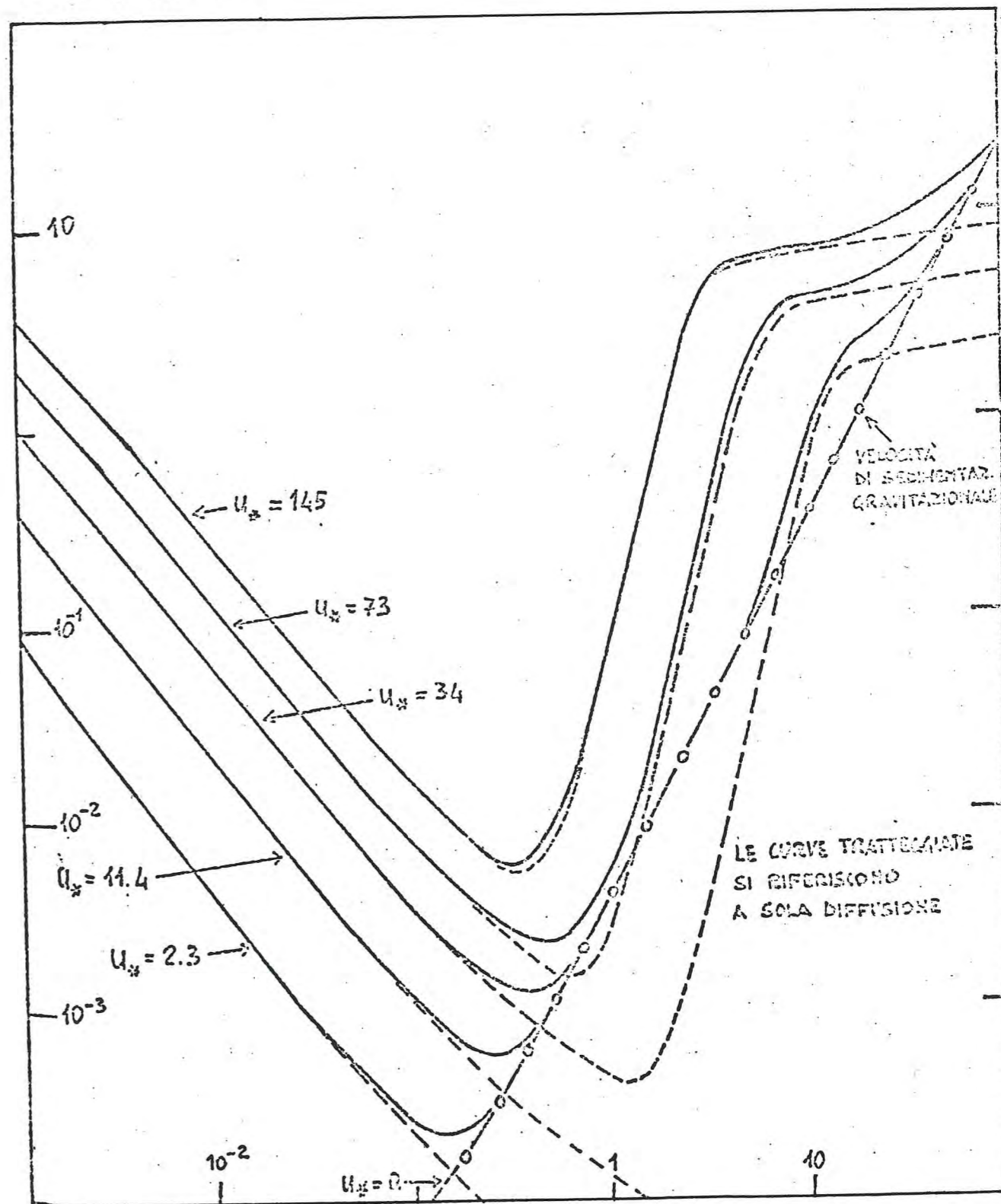
FIG. 1



Deposizione secca su superficie liscia per particelle con densità 1.5 g/cm^3 per vari regimi. La "friction velocity" u_* dà una misura della turbolenza; per $u_* = 0$ si ha regime laminare. In ascisse è indicato il diametro delle particelle in μm , in ordinate il flusso di deposizione per concentrazione unitaria delle particelle, in cm/sec .

FIG. 2

Deposizione secca, come nel caso di figura 1, per particelle con densità $1,0 \text{ g/cm}^3$.



alti regimi di turbolenza, una reimmissione delle particelle depositate entro il fluido in moto. Questo effetto è in genere trascurabile per particelle al di sotto di 10 μm .

Un'ampia discussione dell'adesione di particelle alle pareti è fatta da Corn, in *Aerosol Science*. Diversi fattori sono presi in considerazione: importante è per esempio il grado di contaminazione della superficie e la forma delle particelle stesse, oltre alla natura del materiale.

L'effetto di una superficie evaporante o condensante è stato ampiamente studiato da vari autori, nel caso di fluidi in quiete o in moto laminare. Il risultato è che presso una superficie evaporante si instaura uno spazio libero da particelle, dello spessore di qualche centinaio di micron (funzione delle caratteristiche geometriche del sistema e del gradiente di vapore) nel quale le particelle possono penetrare solo per diffusione browniana. In ogni modo, la deposizione su una tale superficie è del tutto trascurabile in molti casi, mentre su una superficie condensante la deposizione è estremamente accentuata (si veda, ad esempio, Goldsmith e May, in *Aerosol Science*). Questo effetto è certamente assai rilevante nel contesto dello studio della deposizione di materiale particellato su pareti in vani chiusi, tenuto conto del fatto che non sono infrequenti fenomeni di condensazione di umidità su tali pareti, causati dai motivi più vari.

In regime turbolento poco si sa sull'influenza della evaporazione. È facilmente intuibile che tale effetto si debba manifestare in misura più ridotta che non nel caso laminare. Tuttavia esiste almeno un lavoro sperimentale (Caporaloni et al. 1975b) che ha mostrato che l'effetto di una superficie evaporante è sensibile anche in regime turbolento, riducendo la deposizione di particelle di un fattore da 2 a 4, almeno per particelle con raggio tra 1 e 10 μm . Alla luce di questo risultato occorre tener presente questo effetto nello studio della deposizione su superfici investite da flussi d'aria turbolenti.

6 CAMPIONAMENTO ED ANALISI

Le tecniche di campionamento e di analisi di materiale particellato sono molte, e soggette a continui perfezionamen-

ti; nuove metodologie vengono sviluppate, rivolte in particolare modo a problemi specifici. Qui di seguito si tratterà di tecniche di campionamento ormai ben collaudate, e che possono dare ottimi risultati standard. Qualche indicazione relativa a tecniche particolari si troverà in bibliografia, per quanto riguarda soprattutto le metodologie più recenti, che spesso sono ancora allo studio. Si vedano come esempio i lavori di Silvermann et al. (1964) e di Thompson et al. (1967), e quello di Seaney (1973).

6.1 Alcune osservazioni sulla teoria del campionamento

Ogni studio sulla composizione di aerosol inizia col campionamento mediante un apparato quale un filtro, un condensatore, un tyndalometro o cella ultramicroscopica. Se si vogliono ottenere risultati corretti la differenza in concentrazione e distribuzione dimensionale delle particelle tra il fluido in esame e il campione deve essere minima. Questa differenza può essere causata in parte dalla deposizione di particelle entro lo strumento di raccolta (per esempio nel tubo attraverso il quale l'aerosol entra) e in parte da fenomeni che si generano all'imboccatura dello strumento stesso. Quest'ultimo tipo di fenomeno è legato alle caratteristiche inerziali delle particelle trascinate dal fluido. Se l'asse del tubo di ingresso del campionatore presenta un angolo non nullo rispetto alla direzione locale media della velocità del fluido, parte delle particelle andrà a depositarsi presso la imboccatura. D'altro canto se la velocità a cui l'aria viene aspirata entro il campionatore è maggiore o minore della velocità media dell'aria, una quantità di particelle minore o, rispettivamente, maggiore di quella esistente nell'aria (per volume unitario) verrà campionata. Problemi di campionamento isocinetico sono trattati da vari autori; si può vedere per esempio Sehmel (1967a, 1967b). Attenzione va anche prestata al campionamento di particelle dotate di velocità di sedimentazione non nulla. In particolare quando si campionano insieme polidispersi di particelle occorre spesso introdurre correzioni opportune, funzioni delle dimensioni. Per qualche osservazione al riguardo, si veda Fuchs, già citato.

Il problema della deposizione di particelle sulle pareti interne del campionatore rientra nello studio dei fenomeni di deposizione in flussi laminari o turbolenti. Le considerazioni fatte in precedenza si applicano bene in questo caso;

occorrerà valutare l'entità di questi fenomeni ed apportare eventualmente opportune correzioni alle misure.

6 2 Problemi di campionamento

La determinazione quantitativa di materiale particellato richiede diverse fasi, ciascuna delle quali può comportare errori di varia natura. Qui di seguito si elencano alcuni dei problemi operativi che si possono incontrare.

- Dimensioni del campione. E' necessario in genere predeterminare la quantità di aria da campionare in ciascuna situazione. Questo implica la conoscenza, o una valutazione attendibile, della quantità minima di materiale particellato che si può incontrare; così come dei limiti di sensibilità dello strumento usato.

- Tasso di campionamento. Il tasso di campionamento è determinato dalla strumentazione usata, e, in misura essenziale nel caso attualmente studiato, dalle caratteristiche del fluido e delle particelle (campionamento isocinetico). Questo può contrastare con la necessità di eseguire campionamenti in tempi ristretti; una attenta valutazione dei diversi fattori è in questi casi essenziale all'ottenimento di dati attendibili.

- Durata del campionamento. L'analisi dei problemi suindicati conduce in genere alla determinazione di un intervallo di tempo ottimo per il campionamento. D'altra parte, ogni intervallo di campionamento implica ovviamente il fatto che la concentrazione misurata sia il valor medio della concentrazione presente in aria in quell'intervallo di tempo. Questo fatto può costituire un inconveniente se si suppone che durante tale intervallo si abbiano variazioni di concentrazione che interessano registrare.

- Efficienza di campionamento. In linea di massima, ogni strumento cattura solo una percentuale delle particelle contenute nell'aria che fluisce entro di esso, e tale percentuale può essere funzione delle dimensioni delle particelle stesse. Non si richiede una efficienza del 100%, ma è importante che tale efficienza sia nota e riproducibile. In genere si afferma che l'efficienza dovrebbe superare il 50%, ma spes-

so risultano essere usati strumenti con efficienza ben inferiore, almeno su certi intervalli di dimensioni.

Per strumenti collettori di particelle, l'efficienza può essere determinata sulla base del peso totale di particelle catturate, o del numero. Se l'aerosol contiene particelle di dimensioni diverse, l'efficienza di cattura calcolata sulla base del peso può essere molto più alta di quella calcolata sulla base del numero, perchè le particelle più grosse contribuiscono in misura rilevante alla determinazione del peso totale. Si può avere una efficienza del 99.9% sulla base del peso contro una efficienza media del 40 o 50% calcolata dal numero di particelle. In relazione al tipo di analisi che interessa compiere, l'uno o l'altro tipo di efficienza andrà preso in considerazione.

Occorre osservare in questo contesto che fenomeni come la coalescenza o il disgregamento durante il campionamento possono alterare le particelle. Pertanto le particelle raccolte possono non essere rappresentative di quelle presenti in atmosfera.

- Altri fattori. L'alterazione dei costituenti e gli effetti dell'immagazzinamento dei campioni hanno in genere poca importanza nello studio del materiale particellato, a differenza di quanto si verifica per l'analisi dei gas. Tuttavia per particolari procedure occorrerà tener conto, per esempio, della solubilità di certi componenti o dell'instabilità dei preparati da esaminare.

6 3 Procedure di campionamento

Qui di seguito si dà un rapido cenno relativo ai principali metodi di campionamento. Vari perfezionamenti vengono introdotti dai ricercatori, per adattare gli strumenti alle particolari esigenze che si possono presentare; alcuni di questi perfezionamenti diventano poi patrimonio comune negli strumenti commerciali, che d'altra parte offrono vantaggi di standardizzazione non disprezzabili in un lavoro di routine. I pochi tratti che verranno in seguito delineati riguardano i principi su cui gli strumenti sono basati, piuttosto che le loro modifiche e perfezionamenti più recenti, per i quali occorre riferirsi alla letteratura specializzata.

-Filtrazione. Nella filtrazione di un aerosol attraverso un mezzo poroso entrano in gioco diversi fattori. Si veda per esempio Pich, in *Aerosol Science* (1966), e Dorman, in *Aerodynamic Capture of Particles* (1960).

L'aria da esaminare viene aspirata attraverso un filtro, che ha dimensioni dei pori diverse a seconda del tipo di indagine che si intende condurre. Il preparato che si ottiene può essere analizzato chimicamente od esaminato al microscopio.

Molti strumenti commerciali sono basati su questo metodo. Una variante è data da strumenti, potenzialmente utilizzabili in lettura continua, che operano una stima della concentrazione di materiale particellato in aria dall'annerimento del filtro, che è realizzato in forma di banda ed analizzato in base alla luce riflessa.

- Impatto. Un gran numero di strumenti molto efficaci e di grand'uso è costituito da impattori, cioè strumenti basati sull'osservazione che le particelle in un flusso d'aria in moto hanno quantità di moto maggiore di quella del volume d'aria spostato. Quando si presenta un ostacolo, la direzione della corrente d'aria cambia rapidamente, e molte particelle vengono proiettate sull'ostacolo.

La teoria di questi strumenti è alquanto vasta; un panorama si può trovare in Fuchs. Molti perfezionamenti vengono continuamente apportati; un esempio (riferito a un problema che può essere importante per la ricerca da farsi) è dato dal lavoro di Sehmel (1973c). Si hanno in genere molte varianti per strumenti di questo genere; talvolta possono venir usati in serie (in "cascata") per aumentare l'efficienza totale di cattura (ma questo fatto è almeno in parte contestato da alcuni ricercatori).

-Termoprecipitatori. Un termoprecipitatore è uno strumento che utilizza il processo di termoforesi per depositare particelle su una parete (fredda). Già si è detto di questo processo al paragrafo 4.2. Un precipitatore termico è uno strumento con efficienza di cattura altissima anche per particelle molto piccole; tuttavia presenta l'inconveniente di funzionare con flussi d'aria relativamente bassi.

- Altri metodi. Altri metodi, come precipitatori elet-

trostatici o centrifughe, esistono anche in versioni commerciali. La letteratura tecnica potrà eventualmente fornire ampi ragguagli su queste tecniche.

6.4 Metodi di analisi

L'atmosfera contiene una grande varietà di materiale in concentrazione assai variabile. Per questo la determinazione esatta della composizione di tutto il materiale particellato presente può essere assai problematica. Inoltre, reazioni chimiche di vario genere, specialmente verificantesi su superfici ricoperte da un sottile velo d'acqua, possono comportare variazioni rispetto alla composizione misurata in aria. D'altra parte, specialmente per gli scopi della ricerca, interessa individuare essenzialmente alcuni componenti che si pensa possano essere particolarmente dannosi nell'ambito delle alterazioni delle superfici; e in questa luce andrà condotta ogni eventuale indagine chimica.

I metodi che si usano nell'analisi sono di vario genere. Si possono indicare i seguenti.

- Analisi gravimetrica. Serve per determinare il contenuto totale di materiale particellato contenuto in atmosfera, e si effettua pesando un filtro collettore. Se si usa un filtro a membrana, questo può essere usato come supporto per analisi microchimiche o per indagine microscopica.

- Metodi chimici. Sono essenzialmente metodi microchimici, e permettono il riconoscimento dei composti solubili o insolubili, organici ed inorganici depositati su filtri a membrana, quali quelli che vengono usati negli strumenti di raccolta.

- Metodi spettrografici. Anche questi metodi vengono applicati partendo da campioni raccolti su filtri. Spettrografi a fiamma possono essere usati comodamente, per esempio, nell'analisi dei composti solubili dei metalli.

- Metodi ad annerimento. Sono molto usati per determinare la concentrazione totale di particelle, in funzione dell'annerimento del filtro collettore. Sono già stati sostanzialmente trattati parlando degli strumenti di campionamento

rosione dei metalli. L'effetto può essere dovuto alla diluizione e al lavaggio dei prodotti reagenti; d'altra parte spesso si può avere accumulo di tali prodotti in particolari regioni dell'oggetto metallico e un locale incremento della corrosione.

- Temperatura. La temperatura ovviamente influenza la velocità di reazione e quindi può in certa misura accelerare il tasso di corrosione. Il calo di temperatura di certe superfici in particolari condizioni può aumentare sensibilmente il tasso di deterioramento, a causa dell'umidità condensante e dei meccanismi foretici che si vengono ad instaurare aumentando la quantità di materiale particellato che si deposita sulla superficie.

- Movimenti d'aria. La velocità dell'aria è importante nel determinare la deposizione di materiale particellato. In regime turbolento (quale si verifica normalmente in atmosfera libera) la deposizione di particelle cresce in modo sensibile e così il danno provocato. La direzione media del vento è importante per valutare gli effetti su superfici variamente orientate.

7 3 Alcune caratteristiche del deterioramento su particolari materiali.

Normalmente il materiale particellato causa deterioramento per accumulo su superfici. Come si è già fatto notare in precedenza diversi tipi di fenomeni possono instaurarsi e provocare danni diversi. Una breve analisi degli effetti su particolari materiali viene sviluppata qui di seguito.

- Metalli. Il materiale particellato appare essere un fattore importante nella corrosione dei metalli, particolarmente in presenza di gas a reazione acida. Diversi esperimenti sono stati fatti a questo proposito, particolarmente in relazione alla presenza di SO_2 e di particelle di vari sali, o polveri. Nella maggior parte dei casi la corrosione aumenta in presenza di umidità, come è da prevedere. Altre prove hanno evidenziato che importanti fattori in questo tipo di corrosione sono i componenti solubili della polvere, il pH raggiunto dalla soluzione risultante, e la concentrazione di alcuni ioni (come cloruro e solfato).

- Materiali da costruzione. I componenti carboniosi risultanti da combustione incompleta che si accumulano sugli edifici possono provocare danni di vario genere. La corrosione che spesso segue al deposito è di lunga durata, poichè tali componenti non vengono dilavati dalla pioggia.

- Superfici dipinte. Quanto più poroso è il loro materiale costitutivo, tanto maggiore è l'accumulo di materiale particellato sulle superfici. La deposizione di tale materiale avviene prevalentemente a secco, ma ha effetto di deterioramento collegato ai movimenti d'umidità.

- Tessuti, materiali cartacei. L'impolveramento di tessuti e di materiali cartacei in genere non è in sé dannoso, escluso il caso di polvere altamente abrasiva o di materiali soggetti frequentemente ad azioni meccaniche.

Molti fenomeni possono condurre particelle solide sui suddetti materiali, in particolare fenomeni, oltre che meccanici, termici ed elettrostatici.

Una osservazione finale. Una certa parte del materiale particellato responsabile dello sporco di oggetti e superfici è trasportato su di essi da goccioline d'acqua, cosicchè spesso non è possibile distinguere l'effetto delle gocce di acqua da quello delle particelle. Anche molti reagenti chimici vengono trasportati sulle superfici da goccioline d'acqua, in condizioni che si verificano abbastanza spesso. Si pensi per esempio che nell'atmosfera della Val Padana è sempre presente acqua liquida, cioè goccioline, in grado di raccogliere e trasportare inquinanti. Forse non è del tutto superfluo accennare al fatto che le goccioline si comportano e si depositano in maniera assai simile, per molti aspetti, alle particelle solide.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- 1) N.C. DAVIES, Aerosol Science, Academic Press, 1966
- 2) A. C. STERN, Air Pollution, Vol. I,II,III, Academic Press, 1968.
- 3) P.L. MAGILL, F.R. HOLDEN e C. ACKLEY, Air pollution handbook, McGraw-Hill, 1956.
- 4) E.G. RICHARDSON, Aerodynamic Capture of Particles, Pergamon Press, 1960.
- 5) L.W.B. BROWNE, Deposition of particles on rough surfaces during turbulent gas-flow in a pipe, Atmosph. Envir., 8, 801, 1973.
- 6) M. CAPORALONI, F. TAMPIERI, F. TROMBETTI e O. VITTORI, Transfer of particles in nonisotropic air turbulence, J. Atmos. Sci., in press, 1975a.
- 7) M. CAPORALONI, F. TAMPIERI, F. TROMBETTI e O. VITTORI, Evidenza sperimentale dell'effetto Stefan nella deposizione di particelle in regime turbolento, pres. a IV Assemblea A.G.I. e in pubbl. su R. Ital. Geof., 1975b.
- 8) W.S. CLOUGH, Transport of particles to surfaces, J. Aerosol Sci., 4, 227, 1973.
- 9) G.T. CSANADY, Turbulent diffusion of heavy particles in the atmosphere, J. Atmos. Sci., 20, 201, 1963.
- 10) A. EINSTEIN, Investigation on the theory of the brownian movement, Dover pubbl., 1956.
- 11) R.D. FLECHTER, Suspensoid stratification in the atmosphere Phis. Fluid., 10, S233, 1967.
- 12) N.A. FUCHS, The mechanics of aerosols, Pergamon Press, 1964.

- 13) P. GOLDSMITH, H.J. DELAFIELD e L.C. COX, The role of diffusiophoresis in the scavenging of radioactive particles from the atmosphere, Q.J.R. Met.Soc., 89, 44, 1963.
- 14) C.E. JUNGE, Air chemistry and radioactivity, Academic Press, 1963.
- 15) I. LAUFER, The structure of turbulence in fully developed pipe flow, NACA Tech. Rept. 1174, 1954.
- 16) J.D. LOCATELLI e P.V. HOBBS, Fall spreads and masses of solid precipitation particles, J. Geoph. Res., 79, 2185, 1974.
- 17) F. PASQUILL, Atmospheric diffusion, D. van Nostrand C., 1962.
- 18) F. PASQUILL, Atmospheric dispersion of pollution, Q.J.R. Met. Soc., 97, 369, 1971.
- 19) R.A. SCRIVEN e B.E.A. FISHER, The long range transport of airborne material and its removal by deposition and washout. I. General Considerations. Atmos. Env., 9, 49, 1975.
- 20) R.A. SCRIVEN e B.E.A. FISHER, The long range transport of airborne material and its removal by deposition and washout. II. The effect of turbulent diffusion. Atmos. Env., 9, 59, 1975.
- 21) R.J. SEANEY, Measurement of the mass concentration of airborne dust in coal mines by light-scattering. J. Aerosol Sci., 4, 245, 1973.
- 22) G.A. SEHMEL, Errors arising from anisokinetic sampling of particles flowing in a conduit. BNWL 481 - 3, 81, 1967a.
- 23) G.A. SEHMEL, Particle deposition within a curved sampling probe, BNWL 481 - 3, 90, 1967b.

- 24) G.A. SEHMEL, Particle eddy diffusivities and deposition velocities for isothermal flow and smooth surfaces
J. Aerosol Sci., 4, 125, 1973a.
- 25) G.A. SEHMEL e F.D. LLOYD., Influence of soil resuspension on the airborne particle size distribution
BNWL, 1751 PTI, 1, 1973b.
- 26) G.A. SEHMEL, Evaluation of hi-volume cascade particle impactors, BNWL 1751 PTI, 22, 1973c.
- 27) B.A. SILVERMANN, B.J. THOMPSON e J.H. WARD, A laser fog disdrometer, J. Appl. Met., 3, 792, 1964.
- 28) B.J. THOMPSON, J.H. WARD e W.R. ZINKY, Application of hologram techniques for particle size analysis, Appl. Opt., 6, 519, 1967.

I N D I C E A N A L I T I C OMETODI DI RILEVAMENTO DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO0 GENERALITA'1 RILEVAMENTO DELLE SOSTANZE GASSOSE1 1 Ossidi di zolfo1 1 1 Metodi che misurano la reattività di una superficie sensibile1 1 2 Metodi per titolazione1 1 3 Metodi elettrochimici1 1 4 Metodi fotometrici1 1 5 Metodi gascromatografici1 1 6 Metodi spettrofotometrici1 1 7 Altri metodi1 2 Acido solfidrico1 2 1 Metodi fotometrici1 2 2 Metodi elettrochimici1 2 3 Metodi gascromatografici1 2 4 Metodi analizzatori con rilevatore a fotometria di fiamma1 3 Zolfo totale1 3 1 Metodi elettrochimici1 3 2 Metodo con rilevatore a fotometria di fiamma1 4 Ossidi dell'azoto1 4 1 Metodi fotometrici (NO₂, NO, NO_x)1 4 2 Metodo fotometrico in soluzione (NO₂, NO, NO_x)1 4 3 Metodi elettrochimici (NO₂, NO, NO_x)1 4 4 Metodi a chemiluminescenza (NO₂, NO, NO_x)1 4 5 Metodi spettrofotometrici a derivata seconda (NO₂, NO)

1 4 6 Metodi a spettrometria di correlazione (NO₂)

1 4 7 Metodo potenziometrico (NO_x)

1 4 8 Metodo gascromatografico (NO_x)

2 RILEVAMENTO DEL MATERIALE PARTICELLARE

2 1 Metodi con campionamento e misura separati

2 2 Metodi a riflettanza o trasmittanza di luce

2 3 Metodi a trasferimento di carica elettrica

2 4 Metodi per diffrazione della luce

2 5 Metodo a radiazioni beta

2 6 Metodo a cristallo di quarzo vibrante

2 7 Metodo a nuclei di condensazione

BIBLIOGRAFIA

0 GENERALITA'

I metodi di rilevamento degli inquinanti atmosferici sono numerosi e variamente impiegabili nei sistemi di controllo delle qualità dell'aria.

Tali metodi si dividono in due principali categorie, a seconda che il rilevamento avvenga in maniera continua o discontinua, con tecniche di analisi automatica e non. Gli inquinanti che vengono presi in considerazione sono essenzialmente i composti dello zolfo, gli ossidi di azoto ed il materiale particellare.

Tali sostanze si trovano in quantità assai variabili nell'aria atmosferica, per cui le caratteristiche dei sistemi di rilevamento sono spesso differenti in funzione degli scopi da raggiungere.

0 1 Composti dello zolfo

0 1 1 Idrogeno solforato

La misura dell'idrogeno solforato contenuto nell'aria trova un ostacolo nel doverlo determinare a livelli di concentrazione estremamente bassi.

La determinazione dell'idrogeno solforato può essere effettuata sfruttando la reattività dell'H₂S per formare sospensioni o, su supporti solidi, macchie di sali solforati, utilizzabili per il rilevamento della sua concentrazione per via fotometrica. Tale tecnica ha visto dapprima l'impiego dello ione argento, poi dello ione mercurio, per quanto il metodo al blu di metilene appare, seppure più complesso, un metodo di maggiore affidabilità.

Questi metodi, inizialmente sviluppati per determinazioni non automatiche, sono stati in seguito modificati per consentire tecniche di analisi automatica; i metodi elettrochimici e quelli che, dopo aver realizzato con opportuni mezzi la necessaria specificità, sfruttano il principio del rilevatore a fotometria di fiamma, sono stati invece concepiti per l'analisi automatica continua.

0 1 2 Anidride solforosa

Per la determinazione dell'anidride solforosa sono stati impiegati molti metodi, manuali od automatici, con i quali è possibile effettuare sia un prelievo esteso a prefissati periodi di tempo, sia una misura istantanea della concentrazione dell'inquinante sul campione considerato.

L'ampia diversificazione delle tecniche di analisi è legata alle caratteristiche della SO_2 : provoca luminescenza quando ne avviene la combustione in atmosfera ricca di idrogeno; origina reazioni ossidoriduttive valutabili per via volumetrica, colorimetrica ed elettrochimica; è facilmente ossidata ad acido solforico cui è possibile applicare ogni metodo di titolazione degli acidi forti e degli ioni solfato; con opportuni reattivi può dare origine a prodotti colorati suscettibili di determinazione fotometrica.

Fra i metodi manuali più usati figurano quelli previsti nel regolamento per l'esecuzione della legge 13 Luglio 1966, n. 615; fra gli automatici quelli ad emissione di fiamma, i colorimetrici basati sulla reazione di West-Gaeke ed un certo numero di metodi elettrochimici. Sono state anche impiegate alcune tecniche che utilizzano la spettrofotometria diretta in fase gassosa.

0 1 3 Anidride solforica

La vita della SO_3 gassosa, originata nell'atmosfera dell'anidride solforosa secondo reazioni più o meno rapide, è comunque breve perché con il vapore d'acqua si trasforma immediatamente in acido solforico, che persiste poi in sospensione allo stato di aerosol.

Per la sua determinazione quasi tutti i metodi esistenti si basano sulla raccolta di tale aerosol in adatti filtri di carta o di vetro, con precipitatori elettrostatici ecc.; l'analisi chimica, generalmente basata su determinazione acidimetrica o dei solfati totali, non può dare un risultato specifico in quanto vi rimane comunque

bloccato anche il materiale particellare presente nell'aria.

La sua particolare reattività non permette ancora, al pari di altri inquinanti, di poterne descrivere un metodo specifico, anche se con alcuni metodi non automatici, riferendosi all'analisi della sola SO_3 , si è cercato di eliminare le interferenze più grossolane.

0 1 4 Zolfo totale

La determinazione dello zolfo totale è generalmente eseguita con analizzatori automatici, in genere utilizzanti i rilevatori a fotometria di fiamma.

0 2 Ossidi di azoto

Vengono di norma considerati come inquinanti atmosferici i soli NO ed NO_2 , ovvero la loro somma indicata con NO_x .

I metodi per la determinazione degli ossidi di azoto sono basati su reazioni o proprietà specifiche delle due sostanze le quali possono pertanto essere rilevate selettivamente; analogamente, convertendo per ossidazione o riduzione una specie in quella reattiva, si può giungere alla determinazione degli NO_x . Dei metodi per la determinazione dell' NO_2 , quelli spettrofotometrici in soluzione sono tra i più diffusi; per misure di tipo automatico esistono anche interessanti apparecchiature basate sui metodi elettrochimici o sulla spettrofotometria in fase gassosa. La determinazione di NO è essenzialmente effettuata secondo tecniche automatiche basate su analizzatori a chemiluminescenza, anche se non mancano interessanti apparecchiature funzionanti su altri principi.

Di più scarso impiego risultano invece quei pochi metodi per la determinazione degli NO_x basati su reazioni comuni ad entrambe le specie costituenti.

0 3 Materiale particellare

Il materiale particellare aerodisperso ha una composizione chimica molto variabile e consiste di assembramenti multimolecolari costituiti da cristalli salini, goccioline di acido e di liquidi eterogenei, aggregati solidi, cellule viventi ecc.

Le proprietà dinamiche, ottiche ed elettriche dipendono dalle dimensioni delle particelle: quelle inferiori a 0.1 micron hanno un comportamento simile alle molecole; con diametro maggiore ad 1 micron hanno già una sensibile velocità di sedimentazione che diventa notevole solo quando superano i 10 micron.

I metodi di misura delle polveri sospese sono numerosi e basati su principi diversi, con risultati variamente espressi in dipendenza degli scopi per cui si effettua la misura (massa per unità di volume d'aria, numero di particelle per unità di volume, massa per superficie di raccolta per unità di tempo, classificazione delle particelle in funzione delle dimensioni, etc.).

Le misure possono essere eseguite con "metodi di deposizione" che rilevano tutti i costituenti, sia solidi che liquidi, depositati su superfici od entro raccoglitori durante un dato periodo di tempo.

La raccolta del particolato può essere anche fatta su un filtro, con successiva determinazione della massa per pesata: tale semplice metodo non si presta però a determinazioni automatiche e continue.

Degli altri metodi due soli sono basati su fenomeni direttamente dipendenti dalla massa del particolato e si prestano al monitoraggio automatico: l'assorbimento di raggi e la variazione di frequenza di un cristallo vibrante.

Ogni altro criterio proposto, (riflettanza o trasmissione di macchie di polvere su filtro, metodi nefelometrici ecc.) risente in modo più o meno determinante delle dimensioni e della composizione del particolato per cui si possono ottenere risultati in termini di massa su volume, esclusivamente con l'adozione di fattori di taratura empirici, sulla cui validità esistono notevoli motivi di incertezza.

1 METODI DI RILEVAMENTO DELLE SOSTANZE GASSOSE

I metodi di rilevamento delle concentrazioni inquinanti gassose si basano su diversi principi, essenzialmente riconducibili a criteri fotometrici, elettrochimici, gascromatografici, spettrofotometrici, per titolazione, potenziometrici, a chemiluminescenza, etc.

Tali metodi sono spesso sia di tipo manuale che automatico, e presentano in genere diversi vantaggi e svantaggi, sia per la sensibilità che per l'adattamento a situazioni specifiche.

1 1 Metodi fotometrici

Tali metodi si basano sul principio secondo il quale la reazione con opportune sostanze di un gas presente nell'aria atmosferica produce sospensioni in un mezzo fluido o macchie su superfici solide, utilizzabili per una determinazione fotometrica; infatti la trasmissione dell'energia luminosa attraverso il materiale considerato risulta inversamente proporzionale alla concentrazione del gas in esame.

Le apparecchiature, automatiche e non automatiche, impiegate per tali misurazioni si riferiscono alla valutazione dell'acido solfidrico, dell'anidride solforosa e degli ossidi di azoto.

In particolare per l'acido solfidrico si possono utilizzare i seguenti metodi, basati su diversi reagenti:

- all'acetato di piombo (anche automatico)
- al blu di metilene (anche automatico)

- al cloruro di mercurio
- al blu di molibdeno
- al solfuro di argento
- al nitroprussiato

Sono molto diffusi, anche per le possibilità di analisi automatica, i sistemi fotometrici all'acetato di piombo e al blu di metilene, con i quali si può giungere a limiti di rilevabilità rispettivamente di 0,05-0,02 ppm e 0,002 ppm.

Sono stati anche proposti metodi a fluorescenza, secondo i quali, per la misura del composto prodotto dalla reazione con H₂S, è adottata la tecnica fluorimetrica; è possibile in tal modo giungere ad una sensibilità di 0,005 ppm.

Altre tecniche, applicate in fase gassosa, sono in grado di rilevare anche i solfuri organici che, sebbene con diversi coefficienti, assorbono alla medesima lunghezza d'onda; con tali metodi, che sfruttano misure spettroscopiche all'infrarosso, si può giungere a determinare livelli di concentrazione non troppo bassi (10 ppm).

In merito alla determinazione dell'anidride solforosa vengono impiegati metodi fotometrici assai diversi, tra i quali possiamo ricordare in particolare le seguenti tecniche di analisi non automatica:

- alla fucsina-formaldeide
- al tetracloromercurato di sodio (West and Gaeke)
- all'acido fosforico (Stratmann)
- al blu di metil-timolo (M.T.B.)
- al bario cloroanilato

- agli ioni ferrici
- al sodio nitroprussiato

Tra i sistemi automatici è disponibile una vasta serie di analizzatori spettrofotometrici.

Tali analizzatori funzionano sulla base di principi differenti, riassumibili come segue.

Gli strumenti operanti per spettrofotometria in soluzione correlano direttamente la concentrazione della SO₂ presente nel campione di aria con l'assorbimento ottico di adatte soluzioni reagenti. La formazione del composto colorato può avvenire in modo diverso, ma la reazione attualmente più sfruttata è quella tra acido idrossimetilsoforico e p-rosanilina, secondo il metodo di West-Gaeke.

È possibile reperire strumenti che utilizzano la tecnica dispersiva e, in particolare, la non dispersiva dalla regione dell'I.R. a quella dell'U.V.

C'è da osservare che gli spettrofotometri basati sull'utilizzo della sola legge di Lambert-Beer non si prestano facilmente alla misura degli inquinanti atmosferici quando le loro concentrazioni sono tali da comportare variazioni, nell'intensità luminosa al fotomoltiplicatore, confrontabili con il rumore di fondo dello strumento stesso.

Nella spettrometria a derivata seconda invece, la sensibilità è notevolmente aumentata perchè viene a dipendere dalla velocità con cui cambia il coefficiente di assorbimento della sostanza in esame, al variare della lunghezza d'onda.

Poichè questi strumenti non misurano direttamente una intensità luminosa ma piuttosto la sua variazione intorno ad una lunghezza d'onda prestabilita, viene eliminato in partenza ogni disturbo derivante da variazioni di intensità luminosa della sorgente, da fenomeni di diffrazione legati allo scattering da polveri, e, in genere, da tutti quei fenomeni non rigidamente dipendenti dalla lunghezza d'onda, in un piccolo intervallo di essa.

Il limite di rilevabilità può raggiungere valori di 0,01 ppm.

Altri tipi di analizzatori spettrofotometrici esistenti sono quelli a fluorescenza U.V., a bioluminescenza, a nuclei di condensazione, a maschera di correlazione, a rilevatore con fotometria di fiamma, a ionizzazione. Gli analizzatori con rilevatore a fotometria di fiamma sono particolarmente adatti alla misura dei diversi composti solforati, tra i quali l' SO_2 , adottando la separazione dei composti solforati mediante l'impiego di colonne cromatografiche.

I metodi fotometrici utilizzati per la determinazione delle concentrazioni del biossido d'azoto sono basati sul metodo di Saltzman e su quello di Jacobs-Hochheiser.

Il primo metodo è stato oggetto di numerosi studi che, a cominciare dallo stesso Saltzman, portarono a formulare diverse varianti, per lo più impiegate nell'analisi strumentale, aventi lo scopo di ridurre le interferenze, di migliorare le reazioni e ridurre il costo dei reagenti.

Anche il metodo di Jacobs-Hochheiser è molto diffuso; esso prevede l'assorbimento del gas su soluzione diluita di alcoli, dove i nitriti che si formano vengono poi determinati con una reazione colorimetrica degli azocomposti.

Tra le apparecchiature di analisi automatica per NO_2 ricordiamo:

- analizzatori fotometrici in soluzione
- analizzatori spettrofotometrici a derivata seconda
- analizzatori a spettrometria di correlazione

Esistono numerosi tipi di analizzatori fotometrici in soluzione, per i quali è importante una giusta scelta dei reagenti, a seconda che siano a funzionamento sequenziale o continuo.

In merito al monossido di azoto (NO), essendo un gas con caratteristiche chimiche abbastanza inerti, non è possibile ricorrere ai metodi di analisi tradizionale per via umida e si preferisce, dopo averlo ossidato, determinarlo con i metodi colorimetrici specifici del biossido di azoto.

Dato che l' NO_2 è però sempre presente nell'aria atmosferica, per evitarne l'interferenza si può ricorrere: ad un sistema di analisi in serie (assorbimento e misura di NO_2 , ossidazione e misura assoluta di NO come NO_2), oppure ad un sistema in parallelo (il dato relativo all'NO viene eseguito per differenza delle misure assolute separate di NO_2 e NO_x , intendendo questi ultimi come somma del monossido e del biossido).

Le tecniche studiate per l'ossidazione di NO in NO₂ hanno proposto reagenti in fase liquida, solida e gassosa, i primi sono in genere usati per i metodi non automatici, dato che le analisi strumentali devono poter produrre una risposta veloce; gli ossidanti solidi e gassosi hanno invece questo requisito ma risentono dell'umidità, al di fuori di un certo range specifico.

Gli ostacoli a tali metodi di rilevamento derivano dall'incompleta ossidazione di NO, dall'assorbimento contemporaneo di NO₂, dalla formazione di nitriti per reazione tra NO e NO₂ e da quella di nitrati per l'ossidazione dell'NO₂.

Per analisi di tipo automatico vengono impiegati analizzatori fotometrici in soluzione che, per quanto detto precedentemente, possono misurare anche NO₂ e quindi gli NO_x per mezzo di un convertitore; tali rilevamenti possono essere effettuati anche con gli analizzatori spettrofotometrici a derivata seconda, i quali in particolare misurano anche l'NH₃.

I metodi fotometrici impiegati per l'analisi non automatica degli ossidi di azoto possono essere ricondotti ai seguenti tipi:

- tubi indicatori
- all'acido fenoldisolfonico
- al 2,6 - xilenolo
- alla p-nitroanilina ed azulene
- con reattivo di Nessler.

Le tecniche di analisi automatica sono in genere effettuate con gli apparecchi già descritti per la misura dello NO₂, nei quali un sistema di ossidazione dell'NO ed NO₂ in ingresso li converte in analizzatori di NO_x.

1 2 Metodi elettrochimici

Il metodo elettrochimico per l'analisi non automatica dell'idrogeno solforato fu inizialmente realizzato con tecniche potenziometriche tradizionali; la comparsa degli elettrodi a membrana specifici per lo ione solfuro ha permesso di eliminare quasi totalmente il problema delle interferenze, determinando ad esempio amperometricamente i solfuri.

Gli analizzatori elettrochimici automatici sono numerosi e basati su principi diversi; tra essi si possono citare quelli:

- a colla di concentrazione;
- con elettrodo a membrana;
- amperometrici e coulombometrici;
- a trasduttore;
- conduttometrici.

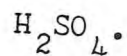
Il rilevamento non automatico dell'anidride solforosa avviene attraverso metodi elettrochimici essenzialmente basati sulla ossidazione con H₂O₂ e determinazione conduttometrica diretta, ovvero mediante il sistema polarografico.

In merito alle tecniche di analisi automatica emergono i seguenti analizzatori:

- a titolazione acido-base;
- potenziometrici;
- conduttometrici;
- amperometrici e coulombometrici;
- con trasduttore.

Gli analizzatori a titolazione forniscono più propriamente la misura dell'acidità forte presente nell'aria, ma hanno qualche problema di interferenze; ciò non si riscontra negli analizzatori potenziometrici perchè impiegano, come rivelatori, gli elettrodi specifici per ioni.

Con apparecchi conduttometrici si misura la conducibilità della soluzione assorbente, contenente acqua ossigenata, nella quale la SO₂ si scioglie e viene ossidata ad



La coulombometria è un metodo di analisi comune a molti inquinanti atmosferici e, in generale, si basa sulla misura della quantità di elettroni necessaria ad ossidare o ridurre una certa sostanza; si tende a non più mantenere la distinzione tra metodi coulombometrici e amperometrici, ed usare quest'ultimo termine, perchè, in definitiva, lo strumento esegue in entrambi i casi una misura di corrente.

Gli analizzatori a trasduttore elettrochimico si basano sull'impiego di un sistema amperometrico di misura in seguito alla ossidazione di SO_2 su un elettrodo sensibile, evitando la normale tecnica per via umida. Il rilevamento dello zolfo totale con analizzatori elettrochimici si basa sulla misura di una somma di potenze (quali H_2S , SO_2 e mercaptani), o altrimenti formando una somma di tutti i composti come SO_2 .

Gli analizzatori elettrochimici messi a punto per la determinazione degli ossidi di azoto (NO , NO_2 ed NO_x) sono numerosi ma presentano l'inconveniente di risentire dell'interferenza delle sostanze ossidanti o riducenti presenti nell'aria; per aumentare la specificità si ricorre quindi all'impiego di filtri. Vengono impiegate, per misure automatiche, le tecniche coulombometriche e amperometriche, e quelle a membrana polarografica.

1 3 Metodi gascromatografici

L'utilizzazione di questi metodi di separazione per il rilevamento dei composti reattivi dello zolfo ha presentato qualche difficoltà a causa della tenacia con cui (in particolare H_2S e SO_2) vengono adsorbiti sulle fasi stazionarie e sulle pareti delle colonne gascromatografiche.

Tale tecnica viene impiegata nella determinazione dell'acido solfidrico e dell'anidride solforosa, associata ai rilevatori a fotometria di fiamma.

Sempre con la limitazione dovuta alla sensibilità non molto alta, il metodo gascromatografico è stato applicato anche alla misura degli ossidi di azoto.

1 4 Metodi per titolazione

Tali metodi vengono impiegati per una determinazione non automatica dell'anidride solforosa, secondo le seguenti tecniche:

- ossidazione con H_2O_2 e titolazione acido-base;
- titolazione con individuazione del punto finale per via fotometrica;
- titolazione e individuazione del punto finale per via elettrochimica;
- dosaggio in presenza di ammoniacca.

1 5 Metodi di determinazione dell'aerosol di H_2SO_4

Per il rilevamento dell'anidride solforica esistono tecniche non automatiche che misurano in pratica l'aerosol di H_2SO_4 , con o senza precedente separazione di altre sostanze.

1 6 Metodi di chemiluminescenza

L'impiego di tale tecnica, specifica per il rilevamento dell'ossido di azoto, utilizza prevalentemente la misura dell'emissione della luce che si produce nella reazione tra l'ossido e l'ozono; è evidente l'adattabilità di tale metodo alla misura degli ossidi di azoto ed alla possibilità di risalire, per differenza, anche alla concentrazione del biossido presente nel campione.

2 METODI DI RILEVAMENTO DEL MATERIALE PARTICELLARE

I metodi di rilevamento delle polveri risultano differenti sia come tecniche, che come principi di funzionamento.

Diamo di seguito un cenno ai sistemi non automatici ed automatici impiegati in tali misure.

2.1 Metodi con campionamento e misura separati

I metodi di campionamento sono spesso riferiti a periodi di tempo di 24 ore e si basano sull'aspirazione dell'aria attraverso un filtro in fibra di vetro (metodi a grande volume), oppure attraverso una membrana o un filtro di carta (metodi a basso volume).

I due metodi presentano diversità di comportamento rispetto alle particelle sedimentabili per cui possono portare a risultati tra loro non concordanti.

La successiva misura della massa raccolta può essere eseguita in maniera gravimetrica, dopo opportuni condizionamenti, oppure per riflettanza della luce.

2.2 Metodi a riflettanza o trasmittanza di luce

Con questa tecnica l'aria è campionata a basso volume, attraverso un nastro di carta sulla quale forma una macchia su cui incide un raggio luminoso, che fornisce la possibilità di eseguire una misura ottica.

Vi sono limitazioni dovute alla taratura dato che, in funzione del tipo di materiale raccolto, il colore della macchia può essere molto diverso anche a parità di massa.

2.3 Metodi a trasferimento di carica elettrica

L'aria viene introdotta in strumenti particolari (tubi di eccitazione) nei quali, a causa della frizione reciproca e contro le pareti, le particelle di polvere si caricano elettrostaticamente; la carica viene raccolta dal circuito analitico dove è amplificata e misurata.

2.4 Metodi per diffrazione della luce

Il campione d'aria viene attraversato da un fascio di luce e la concentrazione delle polveri si misura con un fotomoltiplicatore, secondo l'attenuazione o la diffrazione del fascio luminoso.

2.5 Metodi a radiazioni beta

In questo tipo di apparecchi, il cui campionamento a basso volume viene effettuato attraverso un filtro di carta o in fibra di vetro, la massa delle particelle raccolte viene sottoposta ad un fascio di radiazioni provenienti da una sorgente di raggi beta; la radiazione viene misurata con un contatore di tipo Geiger Mueller.

2.6 Metodi a cristallo di quarzo vibrante

Tali tecniche prevedono la precipitazione elettrostatica delle particelle di polvere nella superficie di un cristallo di quarzo piezoelettrico, oscillante alla sua frequenza di risonanza; tale frequenza varia in funzione della massa precipitata nella piastrina.

2.7 Metodo a nuclei di condensazione

Questa tecnica di analisi, già citata nel campo degli analizzatori dell' SO_2 , viene applicata anche per la misura del materiale particellare.

Le apparecchiature sono costituite da un convertitore e da un rilevatore dei nuclei; si ottengono nebbie la cui trasmittanza è proporzionale al numero dei nuclei di condensazione presenti.

B I B L I O G R A F I A G E N E R A L E

- 1) J. DETRIE La pollution atmospherique, Dunod - 1969
- 2) N. DOTREPPE - GRISARD La pollution de l'air, Eyrolles-Cebedoc - 1972
- 3) E.P.A. Compilation of air pollutant emission factors, Research Triangle Park - 1973
- 4) W. FAITH - A. ATKISSON Air pollution, John Wiley - 1972
- 5) U. GHEZZI - C. ORTOLANI Combustione e inquinamento, Tamburini Editore - 1974
- 6) W. LEITHE The analysis of Air pollutants, Ann Arbour Science Pub. - 1971
- 7) K. NOLL - J. DUNCAN Industrial Air pollution Control, Ann Arbour Science - 1973
- 8) G. NONHEBEL Gas purification processes, Newnes - Butterworths - 1972
- 9) G. PENNACCHIA Inquinamento atmosferico da impianti termici civili, in "Materiali per un corso di politica dell'ambiente" - Giuffrè - 1975
- 10) R. D. ROSS Air pollution and industry, Van Nostrand - 1972
- 11) A. ROSSANO Air pollution control, Mc Graw Hill - 1969
- 12) J. SEINFELD Air pollution, Mc Graw Hill - 1975
- 13) F. SINISCALCO - G. ELIAS L'inquinamento dell'aria, PEG Editrice - 1970
- 14) E. STARKMEN Combustion - Generated air pollution, Plenum Press - 1971
- 15) A. STERN Air pollution, Academic Press - 1968
- 16) W. STRAUSS Air pollution control, John Wiley - 1972
- 17) S. WILLIAMSON Fundamentals of air pollution, Addison - Wesley Pub. Co. - 1973

- 18) AA. VV. Thermique et environnement, Revue Generale de thermique - Vol. XII - N° 142 (1973)
- 19) G. MAMANTOV - W. D. SHULTS Determination of Air Quality, Plenum Press - 1972
- 20) D. E. PAINTER Air pollution technology, Reston Publishing Company - Reston (Virginia) - 1974
- 21) F. GUIDOBALDI Inquinanti atmosferici e possibili effetti sui materiali artistici ed archeologici, Istituto di Fisica Tecnica - Roma - 1974
- 22) J. BIBBERO - J. YOUNG Systems approach to Air pollution control, Wiley and Sons - New York - 1974
- 23) T. SCHNEIDER Automatic air quality monitoring systems, Elsevier Scientific Publishing Company - 1974

6 METODI DI INTERVENTO BASATI SUL CONTROLLO
DELLE CONDIZIONI TERMOIGROMETRICHE DI AM-
BIENTI MATERIALI E STRUTTURE

M. Paribeni

INDICE ANALITICO

- 1 CONTROLLO DELLE GRANDEZZE CARATTERISTICHE A MEZZO DI IMPIANTO DI CONDIZIONAMENTO INTEGRALE DI AMBIENTE CONFINATO
 - 1 1 Impianto centralizzato a tutt'aria con o senza ricircolo, con o senza aria esterna; soluzioni a trattamento unico o a più zone
 - 1 2 Impianto centralizzato tipo "duplex" ad aria primaria più apparecchi locali di scambio (corpi scaldanti convenzionali, mobiletti Fan-Coil, ecc.)
 - 1 3 Impianti di tipo speciale (doppio condotto, induzione). Impianti con apparecchi autonomi locali

- 2 CONTROLLO DELLE GRANDEZZE CARATTERISTICHE SOLO IN CONDIZIONE INVERNALE DI AMBIENTE CONFINATO
 - 2 1 Impianto di riscaldamento centralizzato ad aria calda, con controllo indipendente di temperatura e umidità relativa dell'aria
 - 2 2 Impianto di riscaldamento centralizzato a corpi scaldanti locali e aria primaria per il controllo della umidità relativa
 - 2 3 Impianto di riscaldamento centralizzato a corpi scaldanti locali e trattamento locale dell'umidità relativa

- 3 CONTROLLO DELLE GRANDEZZE CARATTERISTICHE CON TRATTAMENTI EFFETTUATI DIRETTAMENTE SULL'OGGETTO DA PROTEGGERE
 - 3 1 Riscaldamento localizzato della superficie dell'oggetto a mezzo di sorgenti di energia raggiante (utilizzabile anche per oggetti conservati all'aperto)
 - 3 2 Riscaldamento a mezzo di sorgenti di calore (resistenze elettriche o tubi percorsi da fluidi caldi) immerse nella struttura
 - 3 3 Protezione di oggetti conservati in ambienti chiusi o semiconfinati a mezzo di getti di aria calda.

4 PROTEZIONE DELLE OPERE D'ARTE DALL'ACQUA

- 4 1 Modi con cui l'acqua raggiunge l'opera d'arte. Infiltrazioni dall'alto; risalita dal basso; condensazione superficiale.
- 4 2 Importanza dei fenomeni di infiltrazione. Strutture più frequentemente responsabili. Metodologie di protezione
- 4 3 Protezione dall'acqua risalente per effetto capillare. Realizzazione di strati di sbarramento col metodo del "taglio in buccia". Cenni sugli altri metodi
- 4 4 Protezione dai fenomeni di condensazione. Metodo del "filo caldo"; metodo del velo d'aria

BIBLIOGRAFIA

SINTESI DEI PRINCIPALI CONTENUTI

1 CONCETTI GENERALI

I metodi d'intervento che verranno qui presi in considerazione sono quelli mediante cui è possibile eliminare o comunque ridurre efficacemente gli effetti di deterioramento determinati da cause fisiche.

S'intendono per tali quelle rappresentate essenzialmente da squilibri tra il "sistema" (bene culturale) e il "mezzo" (ambiente di conservazione). Tali squilibri si manifestano perché il mezzo, cioè l'ambiente, per una serie di cause interne ed esterne sulla cui natura si può ritenere di possedere informazioni sufficientemente complete, tende a modificare il suo stato (cioè compie una trasformazione), mentre il sistema, ossia l'oggetto, ente inanimato e perciò privo di qualunque meccanismo d'autoregolazione, tende a seguire la trasformazione del mezzo con velocità tanto maggiore quanto più ampi sono gli squilibri iniziali.

Da queste premesse si deduce che la soluzione del problema della conservazione è rappresentata da ogni provvedimento atto a ridurre l'entità e la velocità delle trasformazioni che tendono a modificare lo stato del mezzo (1). Non è invece necessario, in linea di principio, che le grandezze assunte come caratteristiche (p.e. temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria, temperatura degli oggetti), assumano valori determinati.

Rinviando per il momento la necessaria distinzione tra i problemi degli ambienti confinati o semi-confinati e

(1) L'altro provvedimento, di costringere il sistema a compiere trasformazioni atte a compensare continuamente e automaticamente gli squilibri tra sistema e mezzo, deve giudicarsi in genere di realizzazione difficile e presumibilmente pericoloso per le conseguenze a cui potrebbe dar luogo.

di quelli aperti, cominceremo con l'elencare, in ordine decrescente di completezza e di efficacia teorica, le categorie di provvedimenti più noti e sperimentati. Queste possono essere così indicate:

- a) - Condizionamento integrale dell'aria dell'ambiente di conservazione, completato con un'apparecchiatura di controllo e regolazione automatica capace di mantenere costanti nel tempo le grandezze temperatura e umidità relativa dell'aria ambiente, temperatura delle pareti limite, ecc.
- b) - Riscaldamento invernale dell'ambiente, realizzato con uno dei metodi conosciuti (aria calda e corpi scaldanti) e provvisto di apparecchiature di regolazione manuali.
- c) - Protezione dell'oggetto per mezzo di riscaldamenti localizzati.
- d) - Protezione dell'oggetto dall'acqua che tenta di raggiungerlo per effetto di risalita capillare, o di condensazione superficiale, o di infiltrazioni dall'alto.

Le prime due categorie, ovviamente applicate ai soli ambienti di conservazione confinati, hanno carattere globale con effetto sull'intero ambiente servito.

2 CONDIZIONAMENTO DELL'ARIA

Il condizionamento dell'aria è un provvedimento tecnico ben noto per mezzo del quale è possibile ottenere che, in un ambiente confinato, i valori della temperatura, umidità e velocità dell'aria, della temperatura delle pareti dell'ambiente o degli oggetti in esso contenuti rimangano costanti nel tempo, nonostante che si verificino apporti o sottrazioni di calore e di vapor d'acqua per cause esterne od interne all'ambiente stesso (trasmissioni di calore e di acqua dall'esterno all'interno dell'ambiente, produzione di calore e di vapor d'acqua entro l'ambiente).

Si realizza per mezzo di un impianto capace di for

nire o sottrarre all'ambiente (al sistema) quantità di calore e di vapor d'acqua pari a quelle che l'ambiente stesso, immaginato in una condizione di regime, contemporaneamente cede all'esterno (o ad eventuali sottosistemi interni), o riceve dall'esterno (o da sorgenti interne). L'impianto deve perciò comprendere almeno un generatore di calore e una macchina frigorifera, un'apparecchiatura, detta gruppo di condizionamento, capace di far compiere all'aria le trasformazioni termodinamiche necessarie (in genere riscaldamento o raffreddamento a pressione costante, con aggiunta o sottrazione di vapor d'acqua), infine il complesso per la regolazione automatica comprendente i sensori (in genere termostati o umidostati) e le apparecchiature per l'esecuzione dei comandi (interruttori, valvole motorizzate con regolazione di portata o miscelatrici, serrande motorizzate), azionate elettricamente o con aria compressa.

Vettore delle quantità di calore e di vapor d'acqua da fornire o sottrarre all'ambiente è una massa d'aria che si fa circolare nell'ambiente stesso, in genere prendendola in parte da questo e in parte dall'esterno. Per completare l'impianto è perciò necessario almeno un ventilatore e un sistema di canali per la mandata dell'aria nell'ambiente, per l'estrazione dall'ambiente, per l'espulsione di parte dell'aria estratta e per la sostituzione di quest'ultima con aria presa dall'esterno.

La quantità di calore che può essere trasferita da un m³ di aria a pressione atmosferica, a cui si attribuisca un calore specifico $\gamma = 0.24$ Cal/Kg e una densità $\delta = 1.25$ Kg/m³ è ovviamente

$$q = \gamma \delta \Delta T = 0,3 \Delta T$$

in cui ΔT è la differenza tra le temperature che l'aria circola nell'ambiente assume all'ingresso e all'uscita dell'ambiente stesso. Poiché per diverse ragioni risulta difficile o poco conveniente far sì che il valore di ΔT risulti superiore ad una decina di gradi in estate e a circa il doppio in inverno, può ritenersi che l'ordine di grandezza della capacità massima di trasporto di un metro cubo d'aria sia di 3 e 6 calorie rispettivamente in estate e in inverno.

Si tratta cioè di valori modesti che rendono necessario far circolare grandi volumi d'aria nell'ambiente (come ordini di grandezza prevedibili, portate orarie comprese fra 3 e 10 volte il volume dell'ambiente, a seconda delle caratteristiche termiche di questo e delle condizioni di progetto prevedibili all'esterno).

Il controllo della temperatura delle pareti limiti dell'ambiente di conservazione, della temperatura degli oggetti e della quantità d'acqua contenuta in questi ultimi, che in principio potrebbe essere effettuato con apparecchiature e sistemi particolari da studiare caso per caso, non è ritenuto in genere necessario.

In effetti un buon impianto di condizionamento dell'aria, progettato con sufficiente larghezza, provvisto di un efficace e completo sistema di regolazione, infine realizzato per consentire la continuità nel tempo del servizio reso, può garantire che le grandezze anzidette, in particolare quelle caratteristiche dell'oggetto, non si modificano nel tempo oltre i limiti di ampiezza e di velocità di variazione consentiti dalle esigenze di conservazione.

Pertanto il condizionamento dell'aria deve essere ritenuto un provvedimento conservativo di grande efficacia e di eccellente livello di sicurezza, a condizione che l'impianto che lo realizza sia di elevata qualità e di piena affidabilità anche per servizio continuo. Sono proprio questi requisiti, in dipendenza dei quali occorre progettare impianti molto complessi con elevato grado di automazione: in definitiva impianti delicati e costosi sia per la costruzione che per lo esercizio, tanto da ridurre l'area di applicabilità del provvedimento. In effetti può affermarsi che questo appare realmente fattibile soltanto quando ci si trova nella necessità di assicurare ottime condizioni di conservazione per opere di arte d'importanza eccezionale; oppure quando si desidera realizzare un'attrezzatura destinata, più che al ricovero permanente, al miglioramento delle condizioni di opere già fortemente deperite.

3 RISCALDAMENTO INVERNALE

Il riscaldamento invernale, che richiede impianti più semplici e perciò assai meno costosi come costruzione e come esercizio, è un provvedimento la cui efficacia dal p.d.v. della garanzia delle condizioni di conservazione può anche essere assai buona, limitatamente, è ovvio, ai periodi dell'anno per i quali il riscaldamento è utile. Poiché per molte situazioni meteorologiche locali e per parecchi tipi di opere d'arte, questi periodi dell'anno sono proprio quelli per i quali è più sentita la necessità di provvedimenti conservativi, il sistema del riscaldamento invernale finisce per risultare di notevole interesse. Tanto da poter essere raccomandato ogni volta che non si ritenga di ricorrere al più complicato e costoso provvedimento del condizionamento integrale. E' appena necessario ricordare che l'impianto di riscaldamento, comunque sia realizzato (con corpi scaldanti tipo radiatori in ghisa o in acciaio, con tubi alettati in aria, p.e. secondo il metodo Runtal, con tubi immersi nelle strutture del pavimento, della copertura o delle pareti, con aria calda) deve essere necessariamente provvisto di un sistema di umidificazione che mantenga costante il valore dell'umidità relativa: come è noto l'umidificazione è una operazione agevole e ben controllabile nei limiti di precisione richiesti ($\pm 10\%$) nel caso degli impianti centralizzati ad aria calda, meno facile nel caso degli altri tipi di impianti per i quali occorre provvedere con umidificatori locali, apparecchi non sempre di efficienza e di qualità accettabili.

A conclusione di questi pochi cenni sulle proprietà degli impianti di condizionamento e di riscaldamento, sembra utile osservare che le conoscenze che si posseggono, tanto sui processi di progettazione e di costruzione di essi, quanto sui risultati che questi possono fornire ai fini della conservazione di opere d'arte in ambienti confinati, possono ritenersi sufficientemente complete e sicure per consentire di trovare una soluzione corretta per qualunque problema che possa presentarsi.

Naturalmente la soluzione più favorevole globalmente va ricercata tenendo presenti, non solo i requisiti ri

chiesti dalle opere d'arte conservate nell'ambiente, ma anche le proprietà termiche dell'ambiente stesso e infine le esigenze delle persone (visitatori, studiosi, conservatori) che in tale ambiente debbono vivere per tempi più o meno lunghi.

Le esigenze delle persone non debbono però essere sopravvalutate in questo caso: non si deve dare a queste esigenze il significato di ragione primaria per la decisione di un provvedimento di condizionamento e di riscaldamento.

L'esame completo dell'altro componente della scelta progettuale, concernente le proprietà termiche dell'ambiente, renderebbe necessarie analisi troppo approfondite e particolari: in definitiva inutilmente complicate e faticose per coloro ai quali questo scritto è principalmente diretto. Ai quali è sufficiente far notare che ambienti caratterizzati da una elevata "inerzia termica" consentono di realizzare quello che è stato chiamato "condizionamento naturale".

Intendendosi per "inerzia termica elevata" la proprietà di un ambiente chiuso di risentire con grande ritardo e con forte attenuazione le variazioni di temperatura che si manifestano all'esterno. E per "condizionamento naturale" quel "trattamento" delle condizioni termoigrometriche di un ambiente chiuso per la realizzazione del quale si sfruttano le sorgenti di caldo e di freddo naturalmente disponibili all'esterno: trattamento che, come è noto, si realizza con un'accurata progettazione dell'edificio (sia per quanto riguarda le strutture e la percentuale di vetratura, sia per quanto riguarda l'orientamento delle aperture) nonché con la accurata manovra delle finestre.

Gli edifici monumentali, che in molti casi vengono utilizzati per la conservazione di altre opere d'arte, sono in genere dotati di elevata inerzia termica. Possono perciò consentire il trattamento che si è chiamato di "condizionamento naturale": a condizione però che si tratti di edifici le cui strutture risultino ben difese dall'acqua di infiltrazione, da quella di risalita capillare e da quella di condensazione.

Tutte le soluzioni cui si è fatto cenno fino a questo momento sono applicabili, come è stato ripetutamente notato, alla conservazione di opere d'arte entro ambienti confinati (o anche di ambienti confinati quando gli ambienti stessi sono l'opera d'arte da conservare).

4 PROTEZIONE LOCALIZZATA DELLE OPERE

Le soluzioni che verranno ora illustrate, di protezione mediante riscaldamenti locali e di protezioni dall'acqua, sono invece applicabili sia al caso di ambienti confinati, da proteggere per se stessi o per le opere che contengono, sia a quello delle opere in ambiente aperto.

Il riscaldamento localizzato di un oggetto è un artificio che rientra nella categoria di quelli per la protezione dall'acqua, dato che si ricorre ad esso principalmente allo scopo di creare condizioni che rendano improbabili fenomeni di condensazione sulla superficie dell'oggetto stesso. Viene realizzato con procedimenti diversi di cui si dà cenno nel prospetto accluso.

Pregio principale di questo metodo è quello di richiedere impegni di potenza molto limitati. Inconvenienti sono quello di richiedere in genere forme di energia costose come quella elettrica e, più grave, quello di fornire risultati non sempre esattamente prevedibili: anche la regolazione è in genere poco agevole.

La protezione delle strutture dalle infiltrazioni d'acqua di pioggia non dovrebbe in genere costituire problema di soluzione difficile: comunque la conoscenza di questa è così diffusa ed ampia da non richiedere particolari illustrazioni.

Più complesso è il problema della umidificazione di strutture (in genere murature di tipo convenzionale) dovuto all'acqua del terreno di fondazione che risale per capillarità.

E' un problema che si presenta con una certa frequenza dando luogo a danni rilevanti fino a qualche metro

di altezza sopra il livello dell'acqua di rifornimento. Non è tuttavia raro che le conseguenze di altri fenomeni, di infiltrazione dall'alto (o di infiltrazione laterale), e più ancora di condensazione superficiale, siano erroneamente attribuite alla risalita capillare.

Il risanamento di una muratura umida per effetto di risalita d'acqua per capillarità può essere ottenuto soltanto a costo di opere importanti, rappresentate dall'allontanamento della falda d'acqua di alimentazione (nei casi non frequenti in cui ciò è possibile), o dal taglio della muratura e dalla interposizione di una barriera a tenuta d'acqua (lastra di piombo o di rame, stratificazioni di impasti di sabbia e resine impermeabili, di asfalti ecc.)

Le altre soluzioni proposte, basate su ragionamenti raffinati o piuttosto grossolani (metodi elettrici derivati da interpretazioni del meccanismo intimo del fenomeno di capillarità, o criteri che tendano ad estendere a questo fenomeno certi principi elementari di idraulica), benchè lungamente sperimentati non hanno dimostrato finora di poter fornire risultati apprezzabili.

5 CONSIDERAZIONI FINALI

Lo stato attuale delle conoscenze nei riguardi dell'insieme di fatti di cui, nelle pagine che precedono, si è data qualche informazione di carattere generale, può dirsi sufficientemente completo e approfondito per ciò che attiene all'individuazione delle cause determinanti e degli effetti che da queste possono essere prodotti.

Per quanto riguarda i metodi impiegabili per contenere sostanzialmente gli effetti delle cause fisiche di deperimento, la situazione appare eminentemente diversa per i due casi degli ambienti chiusi e di quelli aperti.

La tecnologia notevolmente sviluppata dei trattamenti termoigrometrici degli ambienti chiusi consente infatti di affrontare con tranquillità il problema della progettazione dell'impianto o del sistema atto a controllare le condizioni fisiche di un ambiente di conservazione confinato: restando

soltanto la consueta difficoltà della scelta ragionata della soluzione più adatta al caso specifico di volta in volta esaminato.

Quando invece l'oggetto da conservare si trova e deve restare all'aperto, i metodi delle tecnologie anzidette non sono più ovviamente applicabili e, mancando altre soluzioni, non resta che tentare di far ricorso agli artifici dei trattamenti locali di tipo pirico di cui si è, sia pur brevemente, illustrata la modesta e incerta efficacia oppure degli altri, di cui non si è trattato perché tradizionalmente considerati metodi chimici di protezione, rappresentati dall'uso di strati protettivi "di sacrificio" destinati ad essere distrutti in tempi relativamente brevi e ad essere sostituiti.

Quest'ultima osservazione suggerisce di trattare infine l'argomento dell'artificio, sostanzialmente analogo, della protezione stagionale delle opere d'arte all'aperto. E' questo un metodo di conservazione, di cui si è frequentemente discusso, ma che non risulta sia stato mai applicato fino a questo momento, che consiste nell'impiego di strutture mobili da applicare sopra l'opera d'arte per proteggerla durante la stagione invernale (ritenuta a ragione quella più pericolosa per la maggior parte dei tipi di opere d'arte) dai fenomeni tipici di questa stagione (pioggia, vento, freddo e conseguenti possibilità di cambiamenti di fase dell'acqua).

Il metodo è da ritenersi capace di risultare, almeno in certi casi, notevolmente efficace, è certamente poco oneroso e, inoltre, crea l'occasione di eseguire due volte l'anno un controllo, sia pure grossolano, dello stato di conservazione di opere d'arte non accessibili agevolmente.

<u>Metodo</u>	<u>Soluzione</u>	<u>Efficacia - Eventuali inconvenienti</u>	<u>Campo d'Impiego</u>
Riscaldamento per radiazione.	Sorgenti d'energia raggiungono (lampade elettriche a incandescenza con filamento a bassa temperatura). "Filo caldo", realizzato con una resistenza elettrica o con una tubazione percorsa da acqua calda, immerse nella struttura su cui poggia l'opera da proteggere; apparecchi tipo termoconvezione o aerotermi disposti sotto l'opera da proteggere.	Può dipendere dalle caratteristiche di assorbimento dell'oggetto oltre che dall'angolo d'incidenza: occorre controllare che l'assorbimento di radiazioni da parte dell'oggetto non dia luogo ad altri effetti. Si ottiene il riscaldamento di tutta l'opera e anche una corrente convettiva che lambisce l'opera; specialmente con aerotermi muniti di ventilatore adatto si ottengono correnti d'aria calda abbastanza ben distribuita.	Riscaldamento localizzato di superfici piane. Pareti verticali di altezza limitata (l'elemento scaldante si dispone nel pavimento); pareti verticali, anche relativamente alte. Oggetti piccoli di materiale omogeneo senza cavità.
Riscaldamento per conduzione.	Riscaldatori locali sistemati a contatto diretto con l'opera da proteggere o con il supporto di questa.	Sostitutivo del riscaldamento per radiazioni; forse di effetto controllabile più correttamente.	

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- 1) T.N. ADLAM, Radiant Heating, The industrial Press, 1947
- 2) A.S.H.R.A.E. Guide and Data Book, A.S.H.R.A.E. - 1972
- 3) G. PAROLINI, Condizionamento dell'Aria, Ateneo - 1956
- 4) G. PAROLINI - A. FANTINI, Impianti Tecnici dell'edilizia, Sistema - 1970
- 5) C. PIZZETTI, Condizionamento dell'aria e refrigerazione, Tamburini - 1967
- 6) M. LA TOISON, Chauffage et Séchage par Lampes à Rayonnement Infra-rouge, Eyrolles - 1951
- 7) A. MISSENARD, Cours Supérieur de Chauffage, Ventilation et Conditionnement, Eyrolles - 1964
- 8) A. MISSENARD, Le Chauffage et le Rafrachissement par Rayonnement, Eyrolles - 1959

7 METODI DI PROSPEZIONE ARCHEOLOGICA

R.E. Linington

INDICE ANALITICO

1. FINALITA' E CAMPO DI APPLICAZIONE DELLA PROSPEZIONE ARCHEOLOGICA
- 1 1 Premessa. Necessità per gli studi archeologici di evitare scavi inutili e di ottenere il massimo d'informazioni con il minimo danno.
- 1 2 Incidenza del patrimonio archeologico sul territorio. Difficoltà della pianificazione territoriale quando sia sconosciuta l'entità del patrimonio archeologico.
- 1 3 Criteri orientativi del lavoro di prospezione. Classificazione dei tipi d'intervento in relazione alla scala del lavoro.
- 2 METODI DI PROSPEZIONE ARCHEOLOGICA
 Descrizione degli aspetti fondamentali dei metodi disponibili: principio base di ciascun metodo; campo di applicazione specifico; tipi di risultati ottenibili; limitazioni tecniche e pratiche (costo della strumentazione; qualificazione del personale).
 Esame comparativo dei tre diversi gruppi in cui è possibile ordinare i metodi esistenti:
- 2 1 Metodi Basati su Effetti di Superficie
- 2 1 1 Ricognizione in superficie; rapporto tra la prospezione e la ricerca topografica.
- 2 1 2 Aerofotografia.
- 2 2 Metodi di campionamento (metodi meccanici e geochimici).
- 2 2 1 Perforazioni con o senza campioni; carotaggi ecc.
- 2 2 2 Prospezione geochimica (analisi di fosfati ecc.)
- 2 2 3 Altri metodi basati su tecniche di campionamento (paleobotanica ecc.)
- 2 3 Metodi geofisici. Descrizione approfondita dei metodi di più normale impiego. Metodi in corso di sperimentazione: descrizione sommaria e esame delle difficoltà che si frappongono alla loro applicazione pratica.

- 2 3 1 Prospezione magnetica
- 2 3 2 Prospezione elettrica
- 2 3 3 Prospezione elettromagnetica (inclusi metodi ad impulsi)
- 2 3 4 Prospezione sonica
- 2 3 5 Prospezione sismica
- 2 3 6 Prospezione gravimetrica
- 2 3 7 Metodi radioattivi
- 2 3 8 Effetti termici.

3 METODI DI ELABORAZIONE E RAPPRESENTAZIONE DEI RISULTATI
Con particolare riguardo ai risultati ottenibili coi metodi geofisici

4 CONFRONTO GENERALE TRA I METODI
Con particolare considerazione dei problemi elencati nel Cap. 1.

5 ASPETTI ORGANIZZATIVI DELLA PROSPEZIONE

- 5 1 Rapporti Operativi con Istituzioni Accademiche e Soprintendenze
- 5 2 Inquadramento della Prospezione Archeologica nelle Attività di tutela
- 5 3 Formazione del Personale Tecnico
- 5 4 Problemi Economici
- 5 5 Linee di un Programma Nazionale di Prospezione a Lungo Termine

BIBLIOGRAFIA

SINTESI DEI PRINCIPALI CONTENUTI

0 PREMESSA

Le zone archeologiche risultano quasi sempre in qualche modo disturbate o danneggiate. Anche i soli cambiamenti nel livello del terreno, dovuti soprattutto all'agricoltura, sono sufficienti a rendere confuse o addirittura a nascondere le tracce di formazioni archeologiche.

Ancora più gravi sono naturalmente gli effetti dello sviluppo industriale, alla cui rapidità e aggressività è ben difficile che si possa far fronte coi mezzi notoriamente limitati degli organismi di tutela.

La conservazione del patrimonio archeologico "potenziale", così come del resto, ancora più in generale, lo stesso progresso degli studi archeologici, richiedono perciò la disponibilità di metodi di prospezione quanto più possibile precisi, e insieme facilmente operabili su vasta scala con moderato impegno finanziario e organizzativo.

Prima di dare una descrizione dei metodi di prospezione oggi disponibili, è opportuno precisare i diversi tipi di problemi archeologici alla cui soluzione questi metodi possono dare un contributo sostanziale.

1 PROBLEMI SU LARGA SCALA

- A) Ricerca in regioni estese: non solo per individuare beni non ancora in luce, ma anche per rilevare l'andamento generale di antichi insediamenti e per chiarire i problemi generali geografici connessi con i problemi archeologici.
- B) Ricerca rapida in zone estese: necessaria quando è probabile o imminente un intervento capace di distruggere o alterare la stratificazione superficiale del terreno: ad es. la costruzione di una nuova strada o di insediamenti industriali di grandi dimensioni.

2 PROBLEMI DI MEDIA PORTATA

- A) Delimitazione dell'esatta estensione di una zona archeologica conosciuta.
- B) Individuazione di zone non ancora o insufficientemente esplorate.
- C) Individuazione di singole formazioni archeologiche. A volte delle formazioni archeologiche sono conosciute in un punto, o in seguito a scavi o perchè vi sono delle tracce in superficie, ma la loro estensione reale è incerta. Nel caso di formazioni di una certa grandezza, questa ricognizione può essere fatta solo a prezzo di lunghi scavi costosi o che non ripagano la spesa (come per esempio nel caso di fossati, specialmente preistorici).
- D) Ricerca in zone dove non è possibile uno scavo: per esempio in zone coltivate o dove l'utilizzazione della terra non permette un disturbo.

3 PROBLEMI SU PICCOLA SCALA

S'intendono per tali soprattutto quelli occasionati da uno scavo, specialmente quando mancano indicazioni superficiali. In simili casi i metodi di prospezione possono essere utili a vari scopi, ad es.: per individuare la forma e la direzione di una formazione sepolta, o solo in parte scavata; ovvero per accertarsi dell'eventuale presenza di altre formazioni in zone adiacenti.

Naturalmente non sempre in tutti i casi elencati i metodi di prospezione possono essere usati o risultano effettivamente utili. A parte l'eventualità di un loro impiego indiscriminato o con effetti distruttivi, è da tener presente che non sempre le proprietà fisiche dei depositi possono essere messe in evidenza da un'analisi strumentale.

Dal punto di vista fisico, le differenze tra strati archeologici sono spesso molto minori di quello che ci si aspetterebbe teoricamente; inversamente, una uguaglianza esteriore può nascondere delle grandi diversità di caratteristiche fisiche.

4 METODI DI PROSPEZIONE

I diversi metodi di prospezione sono indicati schematicamente nel diagramma della fig. 1.

Sotto il diagramma sono definiti i due fini principali dell'applicazione dei metodi di prospezione; i metodi che sono utilizzabili per tutti e due i fini sono contrassegnati da un asterisco, mentre tutti gli altri servono solo al fine n. 1).

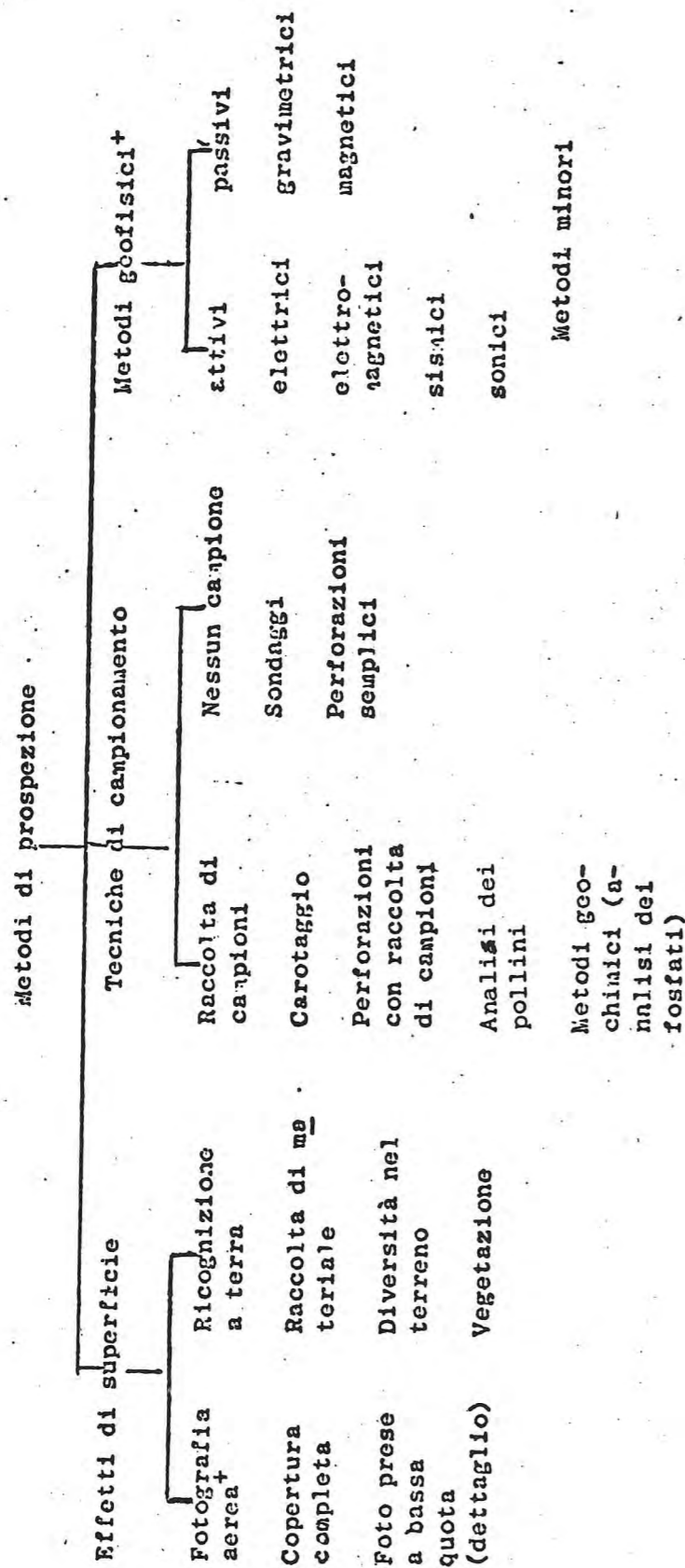
4.1 Effetti di superficie

Al primo gruppo di metodi di prospezione appartengono quei metodi che registrano gli effetti visibili in superficie. Oltre che dalla presenza di resti visibili, l'esistenza di zone archeologiche sepolte può essere rilevata dalla presenza di frammenti di materiali da costruzione o manufatti, normalmente portati in superficie dai lavori di aratura; un'accurata indagine sulla quantità e posizione di questi frammenti, sebbene alquanto laboriosa, può dare informazioni utili. Inoltre sulla superficie del terreno si possono notare anche differenze di colore e consistenza. Questo avviene in molti casi, per esempio quando vi siano tumuli o terrapieni distrutti dalle arature.

Questi indizi danno informazioni solo sulla parte superiore dei depositi sepolti, e sono rilevabili solo quando la copertura di terra è piuttosto sottile e quando la vegetazione è rada o del tutto assente. L'erba in particolare può nascondere tutte le tracce. Questa è perciò una delle ragioni per cui in molte regioni sono conosciute le zone poste in terreni coltivati e non quelle coperte da pascoli.

La presenza di vegetazione non è però sempre uno svantaggio, perchè spesso il tipo di vegetazione e le diversità nel suo sviluppo dipendono dalla presenza di formazioni sepolte.

Infatti le diverse formazioni influenzano la distribuzione della umidità nel terreno, ed anche la quantità di terreno disponibile. Considerando la distribuzione di alcuni tipi di vegetazione, o considerando le zone dove la crescita della vegetazione è più rapida o più lenta, si può spesso dedurre la



+ Metodi utilizzabili per tutti e due i seguenti fini:
 1) Localizzazione di indicazioni che suggeriscono l'esistenza di formazioni archeologiche sepolte, la natura delle quali è incerta. Quindi è necessario un lavoro supplementare di ricerca e scavo.
 2) Localizzazione e indagine di formazioni archeologiche sepolte, con una approssimazione tale da permettere una ragionevole interpretazione della loro natura e della loro estensione. In questo caso o non è necessario alcun lavoro supplementare, oppure un tale lavoro è di portata molto limitata.

Fig. 1

esistenza o meno di formazioni sepolte.

L'inconveniente principale di questi metodi è che tendono ad essere vaghi e soggettivi. E' perciò sempre opportuna l'integrazione della fotografia aerea, con cui si possono coprire rapidamente zone molto estese evidenziandone particolarità superficiali troppo disperse e casualmente dislocate per poter essere registrabili con mezzi d'osservazione ravvicinata.

Anche per questo utilissimo mezzo d'indagine esistono peraltro particolari condizioni che ne limitano severamente l'impiego. Ad esempio: le differenze nell'aspetto della vegetazione che indicano la presenza di formazioni interrate possono prodursi solo in ristretti periodi dell'anno, e risultano evidenti solo in determinate condizioni di illuminazione.

Difficilmente perciò si potrà ritenere esauriente e definitiva una documentazione del genere se le riprese fotografiche sono state effettuate con un solo volo, da un'unica quota e senza variazioni d'angolo.

Questo primo gruppo di metodi basati su effetti di superficie si trova un po' a cavallo tra il lavoro vero e proprio di prospezione archeologica e lo studio della topografia antica. L'una e l'altra attività possono però trarre notevoli vantaggi dall'integrazione dei rispettivi metodi d'indagine.

4 2 Tecniche di campionamento

Il secondo grande gruppo di metodi di prospezione comporta un certo disturbo dei depositi; perciò si potrà farvi ricorso solo quando realmente necessario, e adottando le opportune precauzioni.

A parte i metodi di puro e semplice sondaggio meccanico, utili e leciti solo in rare occasioni, la principale tecnica che rientra in questo gruppo è quella del "carotaggio", applicabile soprattutto in zone sedimentarie e in presenza di materiale uniforme.

Alcune moderne perforatrici servono meglio allo scopo quando si tratta di depositi di materiale vario e si voglia ridurre il rischio dell'eccessiva frantumazione del campione.

Su campioni prelevati in profondità può essere utile, e talora del più grande interesse, effettuare analisi paleobotaniche e geochimiche.

I metodi di campionamento sono da considerarsi elettivi per il controllo di zone estese, specialmente quando gli strati da studiare sono a notevole profondità. L'esatta determinazione della quota di uno strato può ovviamente essere di grande aiuto per valutare preventivamente lo impegno finanziario e organizzativo richiesto da una determinata campagna di scavo.

4 3 Prospezioni geofisiche

Dalla variazione di determinate grandezze fisiche, misurate sulla superficie o comunque a livello del suolo, è possibile dedurre la presenza e la natura di formazioni sepolte, purchè sia abbastanza marcato il contrasto tra le proprietà fisiche dei diversi elementi degli strati archeologici.

In alcuni casi la grandezza di tale contrasto è piuttosto considerevole; ad es. quando nei depositi principali vi sono dei materiali notevolmente diversi, ovvero profondamente alterati dall'azione dell'uomo (ad es.: materiali di antiche fornaci o fonderie). Più spesso, tuttavia, le differenze sono minori ed hanno origine dalla vicinanza di materiali naturali con diverse proprietà; questo è il caso di strutture in pietra sepolte nella terra, o di pozzi e fossati tagliati in strati rocciosi e riempiti di terra. Vi possono essere dei contrasti generati da cambiamenti nelle proprietà del terreno, cambiamenti dovuti spesso all'attività dell'uomo (dislocazioni di strati di humus causati da coltivazione prolungata del terreno).

Infine vi possono essere casi in cui il contrasto è piccolo o addirittura non rilevabile. Ad esempio: un

muro di pietre rozzo può contenere una certa quantità di materiale terroso; se è sepolto in un riempimento, formato dal materiale caduto dalla parte superiore del muro, sia il muro che il riempimento possono avere le stesse caratteristiche, e non vi sono quindi contrasti nelle proprietà fisiche.

Ancora più svitante può essere il caso di un muro con caratteristiche non costanti: in quanto variamente frammentato, di punto in punto, a materiale terroso del riempimento circostante.

Da ciò si deduce che zone archeologiche che hanno dei depositi molto profondi, e di assai diversi periodi di costruzione e demolizione, possono dare risultati assai complessi, tanto più che le variazioni misurate dipendono anche dalla profondità e dalla forma del deposito nel suo insieme, nonché da eventuali effetti di sovrapposizione causati da formazioni adiacenti.

Prima di trattare dei diversi metodi, è opportuno precisare che l'esistenza di contrasti in una serie di proprietà fisiche non implica necessariamente l'esistenza di un contrasto simile in altre proprietà. Perciò le proprietà magnetiche, elettriche, di gravitazione ed elastiche di un materiale possono dar luogo a contrasti di ampiezze non paragonabili: alla variazione di una può corrispondere l'uniformità delle altre, ovvero variazioni senza metro comune. Così nessun metodo di prospezione è universale.

Nella fig. 1 sono stati elencati i principali metodi della prospezione geofisica, divisi in due gruppi: "attivi" e "passivi". Questi termini sono forse non del tutto esatti, ma servono a distinguere due diversi modi di applicazione.

Nei primi, i metodi attivi, si introduce nel suolo un disturbo, e ne viene misurato l'effetto; nei secondi, quelli passivi, si misurano dei valori fisici esistenti. Come conseguenza si ha che il primo gruppo di metodi è d'applicazione più flessibile ma anche più complicata.

Si elencano i principali metodi, con la proprietà fisica implicata:

A - Metodi "Attivi":

- i. Sismici - proprietà elastiche.
- ii. Elettrici - resistività elettrica.
- iii. Elettro-magnetici - resistività elettrica ed effetti magnetici.
- iv. Radioattivi - riflessione ed assorbimento di radiazioni da sorgenti artificiali.

B - Metodi "Passivi":

- i. Magnetici - suscettività magnetica e magnetismo residuo.
- ii. Gravimetrici - variazioni di densità.
- iii. Termici - conduttività termica e differenze nella radiazione.
- iv. Radioattivi - radioattività naturale.

Di questi metodi solo tre possono essere considerati come realmente applicabili al campo dell'archeologia: cioè i metodi elettrici, magnetici ed elettromagnetici; gli altri potranno però esserlo in futuro, e quindi converrà dare anche di essi una breve descrizione.

4 3 1 Il metodo elettrico

Il primo metodo adottato per la ricerca archeologica è stato quello elettrico, o piuttosto della resistività elettrica. Esso consiste nel registrare le variazioni nella resistività elettrica del terreno inviando un flusso di corrente conosciuto attraverso una data sezione del terreno e misurando il voltaggio prodotto. Non è possibile una misura diretta tra due punti, perchè sia l'effetto dell'elettrodo nei punti di immissione della corrente, sia l'interferenza di correnti vaganti nel terreno possono causare notevoli errori. Per superare questa difficoltà si impiegano quattro elettrodi, spesso disposti su una linea retta. Si ottiene un valore di resistività dal rapporto tra la corrente che passa tra due degli elettrodi, e la caduta di voltaggio misurata attraverso gli altri due elettrodi. Con questo accorgimento non si elimi-

na però l'inconveniente di un troppo complicato rapporto tra la resistività misurata e quella reale del terreno.

Per il lavoro archeologico le distanze fra gli elettrodi vanno mantenute piuttosto piccole, in modo da concentrare il flusso della corrente nelle zone superficiali.

Un fattore di grande importanza è la dipendenza dei valori di resistività elettrica dalla distribuzione dell'umidità negli strati interessati. Anche piccole quantità di umidità in depositi non consolidati riducono la loro resistività elettrica. Valori significativi in ohm-cm. sono: roccia calcarea $5 \cdot 10^4$, terreno secco $2 \cdot 10^3$, terreno bagnato (20% di umidità) 50 e acqua salata 5.

Oltre a quello descritto, sono stati usati altri metodi; come ad.es. il metodo delle linee equipotenziali, che però non sembra dare risultati convincenti. A livello sperimentale si sono invece ottenuti buoni risultati col metodo della polarizzazione indotta, che in effetti potrebbe rivelarsi assai efficace soprattutto se usato parallelamente ai normali metodi elettrici. In questo campo, come in quello dei metodi ad impulsi elettrici, sono in corso nuovi studi.

4 3 2 Il metodo elettromagnetico

La prospezione elettromagnetica è risultata di maggiore utilità di quanto si potesse pensare in origine, tanto da doverla ormai considerare un metodo a sè stante. Esso consiste nell'indurre un campo elettromagnetico nelle zone che si vogliono esaminare. Se in queste vi sono delle irregolarità, e soprattutto materiali con conduttività maggiore, vengono generate delle correnti parassite che a loro volta producono dei campi elettromagnetici secondari, misurabili dallo strumento per mezzo di un sistema ricevente.

All'inizio, si riteneva che questo metodo potesse essere utile solo per localizzare oggetti metallici a poca profondità. Strumenti più perfezionati, come quelli che utilizzano sorgenti ad impulsi, hanno invece dato risultati soddisfacenti nella localizzazione sia di metalli che di diversità negli strati di terreno. Qualche difficoltà nella interpretazione dei risultati deriva dal fatto che il siste-

ma riflette sia variazioni magnetiche che di conduttività, e talora molto più quest'ultime che le prime.

In pratica quindi si può dire che il metodo, rispetto a quello della resistività, presenta il vantaggio di non richiedere l'inserzione di elettrodi nel terreno; d'altro canto esso però pone problemi di interpretazione e non si presta a misure in profondità.

Ulteriori studi con strumenti più complessi e con diversi metodi di misura potranno migliorare la situazione.

4 3 3 Il metodo magnetico

Anche se non sempre applicabile, è questo il metodo più ampiamente usato nella prospezione archeologica a partire dal momento in cui si è reso disponibile il magnetometro a protoni, capace di registrare differenze anche molto piccole nella suscettività magnetica.

Normalmente il contrasto più significativo è tra la bassa suscettività della roccia e quella più alta dei depositi terrosi. Inoltre gli effetti dovuti a magnetizzazioni permanenti possono indiziare la presenza di antiche fornaci.

Un problema a parte è rappresentato da zone con rocce vulcaniche, il cui alto magnetismo può portare a una notevole confusione nei risultati. Tuttavia anche qui la prospezione magnetica è risultata spesso utile.

4 3 4 Il metodo gravimetrico

Come con la prospezione magnetica anche col metodo gravimetrico le misure sono eseguite in singoli punti, e in più sono suscettibili di un'interpretazione relativamente più semplice.

La difficoltà maggiore è che le variazioni dovute a formazioni archeologiche sono spesso estremamente piccole, tanto che a volte non si possono neppure misurare. Inoltre i valori misurati vanno spesso corretti a causa dei diversi effetti non archeologici, ciò che rende lento e laborioso il lavoro di rilevamento. Per questo motivo, unito

al costo piuttosto elevato degli strumenti, il metodo non è tra quelli più utilmente impiegabili.

4 3 5 Il metodo sismico

Come è noto il metodo sismico è uno dei principali metodi geofisici. In campo archeologico si è però rilevato di scarsa utilità, anche se lavori sperimentali hanno mostrato che consente di localizzare formazioni archeologiche semplici.

E' peraltro probabile che nuovi studi, basati sull'uso di sorgenti a frequenza molto alta, possano dare risultati più soddisfacenti. Oltre alla possibilità di cambiare la natura della sorgente di energia, la sola altra variabile è data dalla distanza e dal numero degli strumenti di registrazione. Nel sistema più semplice la variabile misurata è il tempo impiegato dall'onda d'urto per attraversare i depositi tra la sorgente e il rivelatore. La natura poco omogenea di molti depositi archeologici è però causa di notevole confusione per le riflessioni e rifrazioni che possono verificarsi.

Può essere utile studiare le differenze nella forma delle onde e specialmente nei componenti di frequenza, mettendo in luce fenomeni di risonanza, assorbimento ecc..

4 3 6 Il metodo sonico

Mentre allo stato attuale delle conoscenze il metodo sismico è praticamente inutilizzabile, un metodo a questo vicino, il cosiddetto metodo sonico, ha dato risultati interessanti per alcuni particolari problemi. Questo metodo si basa sulla possibilità di indurre delle vibrazioni nelle zone che si vogliono esaminare, per mettere in risalto le frequenze di risonanza. Esaminando queste ultime si possono scoprire diversità nella composizione e nella forma delle parti sepolte. Il metodo ha dato risultati particolarmente interessanti nel caso di cavità nascoste in muri.

4 3 7 Metodi radioattivi

Metodi basati sull'uso di sorgenti artificiali di radiazioni non hanno dato finora risultati soddisfacenti, nè sembra possibile da un punto di vista teorico che essi si prestino a fini di prospezione. Di un certo interesse potrebbero invece essere, a fini analitici, misure di differenze nella radioattività naturale tra diversi materiali, tuttavia i livelli d'emissione molto bassi e i problemi di assorbimento delle radiazioni rendono non poco problematico anche questo secondo tipo d'impiego.

4 3 8 Metodi termici

E' certamente possibile, come da più parti è stato proposto negli ultimi anni, l'impiego dei metodi per la rilevazione di deboli differenze nella temperatura del terreno o nelle radiazioni di calore (infra-rosso), ai quali normalmente si ricorre per la ricerca di sorgenti di energia termica. Studi teorici sono incoraggianti, ma finora non si ha notizia di prove pratiche convincenti eseguite su zone o formazioni archeologiche.

5 ESAME COMPARATIVO DEI METODI

Per quel che riguarda la gamma delle possibili applicazioni, i diversi metodi di prospezione sono di fatto assai spesso complementari.

Dovendo comunque operare una scelta tra essi, il criterio sarà dettato dalla natura del singolo problema da risolvere. Ovviamente non potranno non avere una certa influenza considerazioni d'ordine economico, anche se è certo che un'accurata prospezione preliminare consente di economizzare sensibilmente sulle spese dello scavo.

Circa i metodi geofisici, è indubbio che allo stato attuale del loro sviluppo tecnico i metodi magnetici sono più veloci e semplici di quelli elettrici. Vi possono però essere dei casi in cui i risultati elettrici o elettromagnetici risultano più chiari.

L'interpretabilità più o meno agevole dei risultati fornisce quindi un ulteriore criterio per la scelta del metodo da impiegare, tanto più che all'atto pratico questa limitazione s'impone per l'assai piccolo numero di specialisti che hanno maturato una certa esperienza di situazioni di rilevamento particolarmente complesse.

6 ASPETTI ORGANIZZATIVI DELLA PROSPEZIONE

Uno schema organizzativo della prospezione archeologica può articolarsi in quattro gruppi principali, cioè lavoro di routine, lavoro di laboratorio, lavoro sperimentale, insegnamento teorico e pratico.

Questi gruppi sono rappresentati nello schema di fig. 2, insieme all'indicazione sintetica del tipo di lavoro proprio di ciascuno.

Particolari problemi d'organizzazione si pongono soprattutto per i metodi di prospezione geofisica. Il consistente impegno finanziario richiesto per l'acquisto e la manutenzione delle apparecchiature per il rilevamento, unito all'attuale carenza di personale specializzato, rendono consigliabile di concentrare al massimo le risorse disponibili, ma non al punto di addivenire alla soluzione di un unico centro o istituto per l'intero territorio nazionale. La funzionalità di un centro del genere non potrebbe infatti essere assicurata agevolmente, in considerazione del fatto che gran parte della sua attività dovrebbe consistere nel programmare ed effettuare campagne di rilevamento nelle più svariate regioni e località, con un aggravio di problemi organizzativi, logistici e finanziari facilmente immaginabile.

Si ritiene perciò che la soluzione ideale consisterebbe nel creare un primo centro-pilota per l'Italia Centrale, sul cui modello dovrebbero essere quindi costituiti, entro un ragionevole termine di tempo, altri tre centri a copertura delle regioni settentrionali, meridionali e della Sicilia.

Tali centri, oltre ad effettuare le campagne di rilevamento, dovrebbero svolgere lavoro di laboratorio, sia

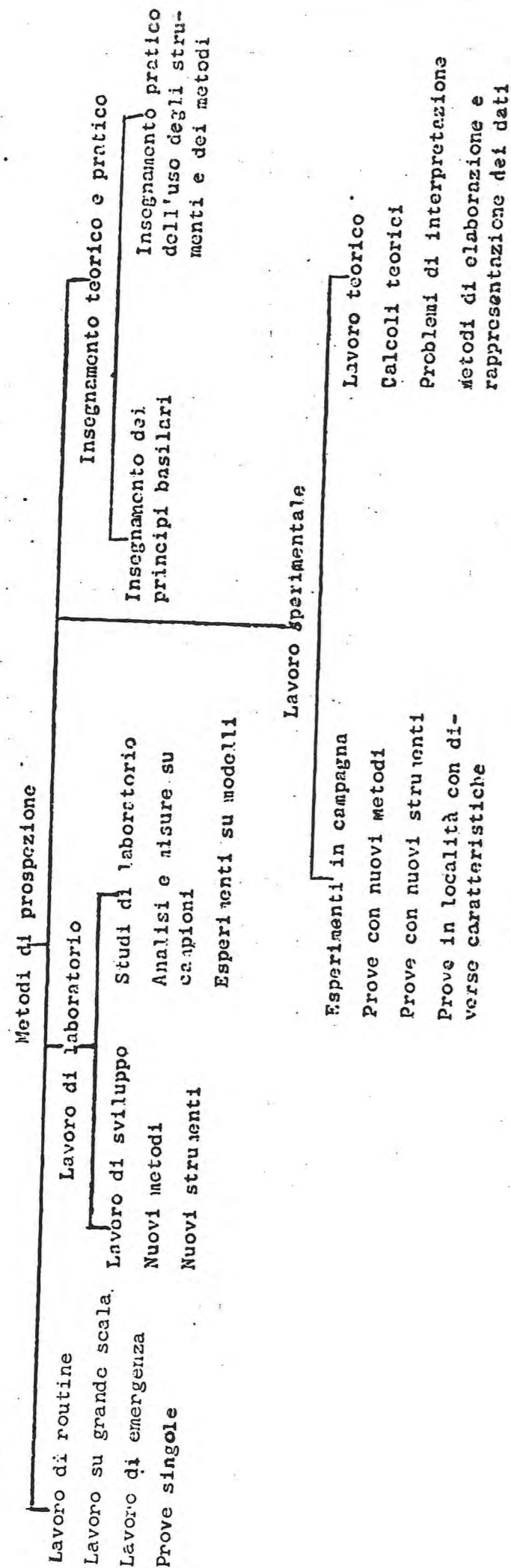


Fig. 2

per l'affinamento delle tecniche di prospezione che per le indispensabili integrazioni della ricerca dal punto di vista analitico, e dovrebbero infine assicurare lo svolgimento di due tipi di corsi: uno di carattere specialistico, destinato alla formazione dei tecnici della prospezione, e l'altro a favore degli archeologi sia dell'Amministrazione che dell'Università.

Ai centri stessi dovrebbero far capo eventuali sezioni staccate, missioni archeologiche o istituti accademici cui fosse consentito di condurre in proprio interventi di rilevamento o di scavo.

Alla costituzione e alla gestione dei centri dovrebbero contribuire, attraverso forme associative da studiare, gli organismi di tutela competenti per territorio e istituti universitari.

Un'organizzazione come quella delineata sarebbe naturalmente in grado di assicurare al meglio l'impiego non solo dei metodi geofisici ma anche di ogni altra tecnica di prospezione.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- 1) A. HESSE Introduction géophysique et notes techniques.
Mirgissa I, Paris 1970, 51-121.
- 2) Masca Newsletter, vol. 7, nn. 1 e 2, 1971
- 3) M. S. TITE, C. MULLINS, Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archeological sites, in Archaeometry, 13/2, aug. 1971, 209-219
- 4) The International Journal of Nautical Archaeology and Underwater Exploration, vol. 1, 1972
- 5) M. S. TITE Methods of physical examination in archaeology.
Seminar Press, London and New York, 1972
- 6) S. RENIMEL, A. TABBAGH, Un atout pour la prospection archéologique: la détection électromagnétique, in La Recherche 30, 1973, 82-84

P A R T E S E C O N D A

NOTE INFORMATIVA

8 METODI NON DISTRUTTIVI DI CARATTERIZZAZIONE DELLE
PROPRIETA' MECCANICHE DI MATERIALI E STRUTTURE

G. Chiesura

O PREMESSA

Le pagine che seguono intendono fornire le informazioni essenziali sui metodi acustici, ultracustici, vibratorii e estensimetrici applicabili alle opere d'arte e ai materiali antichi prevalentemente a fini di caratterizzazione delle loro proprietà meccaniche.

Tale particolare tipo d'applicazione non risulta che abbia costituito finora oggetto di ricerca sperimentale. Si è perciò ritenuto utile formulare, quanto meno a titolo di ipotesi di lavoro, alcune proposte d'impiego dei metodi citati per il rilevamento di parametri come il modulo elastico o la porosità, ovvero per l'esame di difetti di coesione di materiali o di danni alle strutture. Taluni dei metodi in questione possono essere utilizzati anche per misure di contenuto d'acqua, cioè allo stesso fine dei metodi che nel presente volume vengono definiti "termoigrometrici". Ad evitare ripetizioni, tale doppia possibilità d'impiego verrà semplicemente segnalata, lasciando aperta la possibilità di un eventuale confronto tra i vari metodi in occasione degli esperimenti di rilevamento di cui al presente progetto (Vol. I, par. 3 2).

I metodi di cui tratteremo hanno in comune la caratteristica di essere non distruttivi e come tali particolarmente suscettibili di applicazione al campo delle opere d'arte. Per ciascuno di essi si indicano qui di seguito le caratteristiche fondamentali e le potenzialità d'impiego relativamente ai vari tipi di materiali e strutture.

Metodi acustici e ultracustici. Si basano sulla registrazione e la misura di alcuni parametri (velocità, fase, ampiezza e smorzamento, ecc.) di onde aventi frequenze variabili, di cui si provoca la propagazione attraverso il materiale o la struttura in esame. Hanno come campi di impiego materiali quali le pietre calcaree e non, il legno, le ceramiche, le murature. Hanno grande finezza di risoluzione e buona ripetibilità. Richiedono apparecchiature non eccessivamente costose e comunque già largamente diffuse in altri campi. Operabili da personale di grande esperienza anche se non necessariamente di cultura superiore.

Metodi vibratorii. Si tratta di una tecnologia in piena fase di sviluppo, specie per quanto riguarda il rilevamento e l'esame

di vibrazioni indotte da cause esterne diverse (essenzialmente traffico terrestre e aereo).

Ancora rari gli studi condotti per mezzo di vibrazioni provocate "ad hoc". I campi di applicabilità vanno ricercati nello studio di materiali quali pietre e legno, e di intere strutture, sempre abbinando l'impiego di altre tecniche di misura. Il metodo ha grande finezza di risoluzione e buona ripetibilità. Richiede apparecchiature più o meno costose a seconda dei rilevamenti desiderati: dalla semplice misurazione di fenomeni discreti, alla registrazione di fenomeni permanenti, fino all'analisi degli stessi in tempo reale.

Richiede l'opera di personale di grande esperienza e di cultura superiore. Verranno prospettate alcune applicazioni anche all'esame di fenomeni di corrosione.

Metodi estensimetrici. Si tratta di una tecnica di grande interesse perchè, nella forma qui proposta, è caratterizzata da basso costo, buona ripetibilità e finezza di misure, da semplicità di messa in opera e di esecuzione. Specialmente la tecnica degli estensimetri a corda vibrante sta dando ottimi risultati nello studio di materiali, quali pietre e legno, e si sta rivelando prezioso strumento complementare per l'analisi di fenomeni complessi. Attualmente non sembra che altre tecniche estensimetriche, largamente usate in vari campi, siano proponibili con la stessa probabilità di successo, in ragione essenzialmente delle grandi "derivate" che generalmente inficiano le misure sui tempi lunghi. Un'eccezione può forse essere considerata la tecnica degli "scratch-straingages".

Nelle pagine che seguono i singoli metodi vengono più dettagliatamente esaminati sotto il profilo sia teorico che applicativo.

1 METODI ACUSTICI E ULTRACUSTICI

La tecnica consiste nel produrre vibrazioni di determinate frequenze, che si propagano nel mezzo da esaminare sotto forma di onde. Queste provocano un campo sinusoidale di sforzi meccanici nei quali delle zone di depressione si alternano, a intervalli di un quarto di lunghezza d'onda, a zone di sovrappressione.

In particolare, si produce nel mezzo una propagazione di deformazioni di trazione-compressione (onde longitudinali) e una propagazione di deformazioni di taglio (onde trasversali).

Un terzo tipo di onde (di Rayleigh) si propaga di preferenza in prossimità delle superfici libere del solido.

E' evidente che il meccanismo di propagazione di queste onde mette in gioco le proprietà elastiche del mezzo e la sua inerzia.

Il metodo consente, quindi, in primo luogo, la caratterizzazione di materiali quali pietre (soprattutto calcaree, con qualche limitazione per i marmi), mattoni e ceramiche, legno, mediante la definizione del loro modulo elastico E . Ma lo studio della propagazione delle onde è anche ricco di informazioni in merito alle discontinuità che interessano il mezzo di propagazione: ad esempio le pietre (porosità e fessurazione), e gli intonaci (zone di distacco, umidità).

A livello di studi di fattibilità potrebbero essere intraprese le seguenti ricerche.

- 1 1 Caratterizzazione in laboratorio dei principali tipi di pietre di cava utilizzati nei monumenti di un determinato territorio. Rilevamento dei valori delle velocità delle onde longitudinali e trasversali; correlazione fra le variazioni di questi valori con la variazione della porosità e dell'umidità (il rapporto V_t/V_l varia per uno stesso tipo di pietra in funzione della fessurazione).

Le misure dovrebbero essere eseguite tenendo conto dell'anisotropia del mezzo in esame.

Analoga determinazione del modulo elastico potrebbe essere fatta sempre in laboratorio, con il metodo della risonanza (eventuale riferimento alla normativa francese).

La classificazione delle pietre potrebbe essere fatta in base al criterio dell'Indice di Qualità, parametro di grande interesse sul quale sembra essersi recentemente accentrata l'attenzione degli specialisti. Questo indice riferisce ogni roccia al suo campione ideale, perfettamente continuo, valutato sulla base delle costanti elastiche dei diversi minerali costituenti la roccia in esame.

Tale valutazione conduce al calcolo di una velocità di onde ultrasonore teorica, riferita come detto al materiale ideale esente da discontinuità (V_{lc}). Questo valore viene confrontato con il valore delle onde longitudinali effettivamente misurato sul campione (V_l).

Si definisce Indice di Qualità il rapporto percentuale fra V_l e V_{lc} , essendo in ogni caso $V_l \leq V_{lc}$. Allorchè l'Indice di Qualità tende a 100, la roccia tende verso il suo modello perfetto. Inoltre, tale indice consente di distinguere, nella porosità totale di una roccia, le due componenti principali, e cioè i pori, caratterizzati dalla isotropia della loro estensione spaziale, e le fessure, caratterizzate invece dalla maggior estensione di due dimensioni rispetto alla terza.

1.2 Ricerca, da condurre parallelamente in laboratorio e in situ, sulla efficacia dei metodi e dei prodotti usati per il consolidamento (resine o altri). Gli ultrasuoni informano con precisione sulla penetrazione dei prodotti e sul miglioramento delle caratteristiche meccaniche della pietra. Ciò potrebbe consentire una classificazione di metodologie e di prodotti in funzione del tipo di materiale e di struttura. I materiali possono essere pietre, legni, ceramiche, mattoni.

1.3 Un campo di ricerca particolare si profila per le ceramiche lavorate: sarà necessario l'approntamento di trasduttori particolari tenuto conto dei minimi spessori con cui si ha a che fare con questo tipo di opere.

La tessitura del materiale, eventuali fenomeni di sfogliamento e di fessurazione vengono messi in evidenza con misure dei tempi di propagazione di ultrasuoni e delle ampiezze dei segnali.

1.4 L'auscultazione dinamica del legno mediante ultrasuoni sta diventando un importante metodo d'indagine: le sperimentazioni di laboratorio di cui si ha notizia autorizzano a intraprendere con la massima fiducia sperimentazioni in situ. Si dovranno stabilire correlazioni del modulo di elasticità (dinamico) con l'umidità, la resistenza alla flessione statica, la resistenza alla trazione e alla compressione. In situ si potranno quindi determinare variazioni di umidità (misure possibili anche con altri mezzi: ad e. sonde di umidità), fessurazioni, tarlature, efficacia di trattamenti, ecc..

Si ha notizia anche di impiego degli ultrasuoni per l'esame di legname attaccato da funghi. Le apparecchiature elettroniche sono analoghe a quelle necessarie per l'esecuzione della ricerca sopra descritta.

1.5 La ricerca di zone di distacco di intonaci dipinti e paramenti musivi sembra possibile con metodi acustici, previa messa a punto di opportuni trasduttori a frequenza variabile (cfr. parte IV, 1.2 del presente volume).

2 METODI VIBRATORI

Si tratta, in prima istanza, di definire le quantità misurate e il loro ordine di grandezza nell'ambito dei fenomeni studiati.

Una vibrazione, in senso lato, viene in generale definita dall'ampiezza del suo spostamento, dalla sua velocità (o dalla accelerazione), e dalla sua frequenza. Alcuni problemi necessitano della conoscenza della differenza di fase tra questa vibrazione e un'altra della stessa frequenza, o fra quella stessa vibrazione e il fenomeno d'eccitazione.

Nel campo delle applicazioni che ci interessano, il problema si presenta particolarmente complesso. Si tratta non

solo di superare la difficoltà della registrazione di fenomeni diluiti nel tempo e a volte di scarso rilievo (è stato osservato che spesso l'ampiezza di fenomeni vibratorii analoghi a quelli che ci riguardano è inferiore alla sensibilità della strumentazione impiegata per il loro rilevamento), ma di valutare l'influenza di tali fenomeni sulle strutture in esame, e particolarmente su certi aspetti della loro degradazione.

Sulla base di misure delle ampiezze e delle frequenze si è stabilito che gli sforzi indotti dalle vibrazioni sono di gran lunga inferiori a quelli indotti, per esempio, dalla temperatura. Tuttavia in un anno si verificano decine di milioni di cicli di sforzo provocati dalle vibrazioni del traffico e soltanto alcune centinaia (meno di 365) di cicli di temperatura. E' quindi probabile che intervengano fenomeni di affaticamento che complicano le interpretazioni delle misure. Inoltre è chiaro che se ogni singola manifestazione di degradazione (fessura, distacco, cedimento, ecc.) può essere, individualmente, ben compresa e riferita a un fenomeno ovvio, è soltanto quando centinaia di tali manifestazioni sono state esaminate e tabulate che la somiglianza del comportamento attraverso tutto un intero edificio può essere percepita.

La ricerca dovrebbe partire da semplici misure al fine di conoscere l'ampiezza globale della velocità di vibrazione e determinare, mediante decomposizione dei segnali con filtri accordati su una frequenza centrale, quali sono appunto le frequenze per le quali il segnale ricevuto è maggiore.

La registrazione consente più misure simultanee in diversi punti della struttura e in direzioni differenti. In particolare si ritiene che la registrazione debba essere fatta con registratore magnetico a più piste per consentire l'analisi sistematica dei risultati (sotto forma di spettro delle frequenze o di ripartizioni statiche) e un trattamento del tipo integrazione o derivazione.

Ciò detto, si individuano qui di seguito i campi di possibile applicazione del metodo.

- 2 1 Registrazioni di fenomeni vibratorii in vari punti di alcune strutture particolarmente importanti e situate in prossimità di vie di traffico o aeroporti. Particolarmente interessanti sono da considerarsi quelle strutture antiche (chiese o monumenti in generale), che sono venute a trovarsi in prossimità di vie di traffico recentemente aperte o di altre eventuali cause recenti di vibrazioni.

Le registrazioni dei segnali, prolungate per periodi di tempo più o meno lunghi, dovrebbero essere accompagnate da misure con estensimetri a corda vibrante (v. oltre) nonché termocoppie o termoresistenze, piazzati in posizioni opportune sia sulla struttura che su blocchi di pietra (o masselli di legno), posti come testimoni accanto ai trasduttori solidali con la struttura, liberi di dilatarsi e contrarsi, isolati dalle vibrazioni in esame. Misure ottiche potranno integrare i dati così raccolti. Particolare attenzione dovrà essere posta al rilevamento di eventuali cedimenti differenziali del terreno sottostante le fondazioni di detti edifici: nonostante il lungo tempo di consolidamento sembra che questo fenomeno non sia estraneo ai disordini connessi a fenomeni vibratorii.

- 2 2 Connesso con l'impiego delle tecniche vibratorie è il controllo e la misura dei fenomeni di corrosione mediante lo studio delle modalità di dissipazione di vibrazioni indotte con impulsi meccanici sulla superficie da esaminare. Si dovrà ricercare la misura del coefficiente di dissipazione della vibrazione, del coefficiente di attrito interno, e la legge di decremento dell'ampiezza della vibrazione.

I trasduttori di ricezioni potranno essere normali accelerometri. Nel tempo concesso per la ricerca si dovranno eseguire un gran numero di misurazioni su materiali sottoposti a corrosione accelerata. In laboratorio sembrano consigliabili misure di vibrazioni su campioni sottoposti a flessione.

3 METODI ESTENSIMETRICI

Si è a conoscenza di risultati assai soddisfacenti ottenuti in Francia con l'impiego della tecnica estensimetrica a corda vibrante applicata a monumenti antichi. Le misure così realizzate su elementi portanti di vecchi edifici consentono di

individuare le degradazioni, o l'eventuale instabilità dell'insieme, sotto diverse sollecitazioni: cedimenti del terreno, vibrazioni, effetti dei "bangs" prodotti da aerei supersonici, effetti termici e igrometrici. Gli estensimetri a corda vibrante si prestano particolarmente a essere applicati nel campo che qui interessa in ragione della loro semplicità, finezza e precisione della misura e, soprattutto, per la fedeltà del loro "zero" nel tempo.

Questi estensimetri forniscono direttamente le deformazioni relative di lunghezza (Dl/l). Dei "prismi-testimoni", liberi di dilatarsi o contrarsi, giudiziosamente ripartiti in diversi punti della costruzione, consentono non solo di fare le correzioni necessarie per tener conto della differenza di dilatazione termica tra l'acciaio della corda e il materiale in esame, ma anche di definire le sollecitazioni citate più sopra, tracciando dei diagrammi che consentono, per confronto fra l'andamento dei dati rilevati sulla struttura e quelli rilevati sui "prismi-testimoni", di interpretare i valori ottenuti in diversi punti dell'opera.

Comprendiamo in questo paragrafo le sonde di umidità (per le quali si consigliano le sonde a misura di impedenza elettrica) e le sonde per la misura della temperatura (termocopie o termoresistenze).

Una ricerca completa dovrebbe comprendere:

- a) messa in opera di estensimetri a corda vibrante, corredati dei relativi "prismi-testimoni", in diversi punti di tutte quelle strutture per le quali si procederà all'esame di fenomeni vibratorii (V. sopra). Ciò è valido sia per strutture in pietra che in legno;
- b) parallela messa in opera e lettura periodica di sonde cilindriche dielettriche d'umidità, di diametro ridotto (circa 7 mm), che vengono introdotte nel materiale da controllare. Si ricorda che per determinare l'umidità contenuta nel materiale, è necessaria una preventiva taratura su campioni, al fine di collegare i valori elettrici misurati sullo strumento (misuratore di impedenza), con i tenori in acqua determinati per pesate. Le misure di umidità eseguite su materiali lignei dovranno essere accompagnate da misure delle variazioni dimensionali del materiale stesso;
- c) parallela messa in opera e letture periodiche di sonde di temperatura, del tipo comunemente usato e facilmente reperibile sul mercato specializzato.

BIBLIOGRAFIA

- (1) J. BENICAK, G. MARTINCEK: Relationships between Velocity of Flexural Stress Waves and Strength of Wood Particleboards (in Slovak). Drevarsky Vyskum XVIII, 1973, No. 3, 145-162
- (2) J. BENICAK, H. MARTINCEK: Relationships between Elasticity Characteristics and Strength of Wood Particleboards, (in Slovak). Research Report SDVU, No. 41 1973
- (3) D. BERTHOLF, LAWRENCE: Use of Elementary Stress Wave Theory for Prediction of Dynamic Strain in Wood. Washington State Institute of Technology Bulletin No 291, Washington State University, 1965
- (4) M. DAURAT, Contrôle industriel par les ultrasons. Métallurgie et Constructions mécaniques françaises (septembre, novembre, décembre 1954, janvier, mars, mai 1955).
- (5) G. DAWANCE, A. BLANC, J. CHEFDEVILLE: L'auscultation dynamique du béton. Bulletin de la Réunion des Laboratoires d'Essais et de Recherche sur les Matériaux et les Constructions. N° spécial (Avril 1953)
- (6) P. FLEURY, P. MATHIEU: Vibrations mécaniques. Acoustique. Eyrolles 1955
- (7) F. FOURMAINTRAUX, C. TOURENQ, A. DENIS: Propagation des ondes et discontinuités des roches. Symposium international de la SIMR sur la fissuration des roches, Nancy, Oct. 1971
- (8) W. L. GALLIGAN, and R. W. COURTEAU: Measurement of the Elasticity of Lumber with Longitudinal Stress Waves and the Piezoelectric Effect of Wood. Second Symposium on the Nondestructive Testing of Wood, Pullman, Washington: Technical Extension Services, College of Engineering, Washington State University, 1965, pp. 223-233

- (9) J.. GERARD-HIRNE, C. DEPLUS: Méthodes d'auscultation dynamique des produits réfractaires pour le contrôle de leur qualité en cours de fabrication. V^{me} Congrès Céramique International. Vienne 1956
- (10) R.S.F. HEARMON: Non-destructive tests to evaluate the physical and mechanical properties of wood and wood products. Fifth World Forestry Congr. Proc. Washington D.C. 1960, 1318-1323
- (11) F. KOLLMAN: Non-destructive testing of mechanical properties of wood and wood products. A Fifth Conference on wood technology Madison 1963, Paper FAO/WTC/63/S G/4
- (12) R. JONES : A preliminary test of the use of an ultrasonic pulse technique for detecting deterioration of telegraph poles. P.S.I.R. Road Res. Lab. Note No RN 1993-5, June 1953
- (13) J.D.G. LEE: A non-destructive method for measuring the elastic anisotropy of wood using an ultrasonic pulse technique. Timber Development Assoc., Research Report E/RR/9 London, 1958.
- (14) G. MARTINCEK, J. BENICAK: The possibility of Assessing Elasticity Characteristics of Particle Boards by the Phase Velocity Method. Drevarsky vyskum XVII, 1972, no. 2, 63-83.
- (15) G. MARTINCEK, J. BENICAK: The Effect of the Anisotropy of Particle Boards on the Phase Velocities of Stress Waves Propagation (in Slovak). Drevarsky vyskum XVIII, 1973 No. 2, 91-102.
- (16) G. MARTINCEK, M. POKORNY: New Device for Measuring of Physical Characteristics of Materials of Components and Constructions by Dynamic Non-destructive Methods and its Use (in Slovak). Proceedings of Slovak Academy of Science, Vibration and Fatigue of Building Structures, Bratislava, 1969, 113-147.
- (17) G. MATHERON: Eléments pour une théorie des milieux poreux. Masson, Paris 1967.

- (18) MERKULOVA: Mesure de la vitesse des ultra-sons dans certaines roches. Fizika Zemli, URSS, 5, 1965 (trad. LCPC 66. T.80).
- (19) P. MORLIER: Relation quantitative entre la fissuration et la célérité des ondes. Revue de l'Ind. minérale N° Sp, 15 mai 1968.
- (20) P. MORLIER: Description de la fissuration d'une roche à partir d'essais mécaniques. Colloque de Géotechnique, Toulouse 1969.
- (21) J. PAQUET: Mesure d'humidité in-situ par les méthodes diélectriques - Application au béton - Matériaux et Construction (1971) Nr. 205.87/100.
- (22) K. SOMIYA: Relations between defectus in wood and velocity of ultrasonic waves. Jap. Wood Research 34/1965/, 22
- (23) J.S. WAID, M.S. WOODMAN: A non-destructive method of detecting diseases in wood. Nature 180/1947/No 4575.

9 METODI DI ANALISI E CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI
COSTITUTIVI DEI BENI CULTURALI

Istituto Centrale del Restauro

PREMESSA

Nella presente nota informativa vengono esposti in forma sintetica i principali metodi di analisi o caratterizzazione il cui impiego nel campo dei beni culturali è già sufficientemente collaudato, ovvero è oggetto di studi in corso di effettuazione, o che meriterebbero di essere intrapresi.

Come precisato al punto 3343 del progetto è prevedibile che alcuni metodi in questione verranno impiegati per analizzare lo stato dei beni di cui l'indagine di campo avrà accertato una situazione conservativa particolarmente grave o complessa, e per i quali si renderà perciò necessario un esame più approfondito. Scopo di tale esame sarà di verificare in concreto la possibilità di formulare una normativa per almeno i principali metodi che verranno impiegati nell'occasione, e in base ai quali verrà impostata la "Scheda di II livello".

1 DIPINTI MOBILI E MURALI

Nella quasi totalità i metodi disponibili non danno informazioni sullo stato dei materiali costitutivi, ma semplicemente sulla loro natura chimica (analisi di colori, leganti, ecc.), ovvero su aspetti conformativi non direttamente osservabili (radiografie; foto UV, IR ecc.). Fanno eccezione i metodi impiegabili per l'analisi di sali solubili negli affreschi, per i quali si rimanda al successivo paragrafo sui materiali lapidei.

Con tutta evidenza, il settore dei dipinti risulta dunque praticamente sprovvisto di metodi d'indagine, o anche solo di documentazione, che consentano una valutazione oggettiva dei principali fenomeni di deterioramento a carico sia dei vari tipi di supporti che dei fondi preparatori e della pellicola pittorica.

E' sperabile che almeno a una parte di tale grave lacuna si possa cominciare a porre rimedio con le indagini indicate nel paragrafo relativo ai metodi ottici (vol. I, 31), ad esempio con le tecniche colorimetriche e, più in generale, con tecniche fotografiche che pongano in evidenza determinati tipi di danni delle superfici dipinte. Notevoli risultati sono stati comunque già acquisiti con l'impiego dell'interfero-

metria olografica, che ha permesso l'individuazione di distacco del colore in dipinti su tavola (S. Amadesi et al., Applied Optics, 13, 9, 2009, 1974).

Un campo del tutto nuovo di studi potrebbe aprirsi tentando l'applicazione, con opportune modifiche, della metodologia di prova correntemente impiegata nell'industria delle vernici e delle pitture. Ci si riferisce in particolare ai metodi di confronto morfologico tipo ASTM D 659 (resistenza allo sfarinamento di pitture per esterni); D 660 (resistenza alla "cretatura"); D 714 (graduazione dei Sollevamenti di colore). Il tentativo richiede principalmente:

- a) un'accurata definizione del tipo di danno da valutare (ad es.: sollevamenti di colore, di preparazione, d'intonaco; lacune; erosioni del colore ad affresco per migrazioni di sali; ecc.);
- b) la messa a punto d'immagini standard di riferimento (fotografie o rappresentazioni grafiche), rappresentative: della conformazione del danno; delle sue dimensioni iniziali, "medie" e finali; dei vari gradi di frequenza con cui esso può essere presente per unità di superficie.

Fissati in forma numerica i termini di riferimento per ciascuno dei parametri presi in considerazione, la valutazione del danno potrebbe essere data in maniera notevolmente più precisa che su una fotografia o in base a una descrizione verbale, per quanto dettagliate.

Di un certo interesse, anche se gli esperimenti fin qui tentati non hanno portato a risultati soddisfacenti, permangono le tecniche di determinazione del modulo elastico di dipinti su tela mediante metodi vibratorii (v. E. Sorta, in "Problemi di Conservazione"; p. 193, Bologna 1973).

Altrettanto deve dirsi, per i dipinti su tavola, relativamente ai registratori "a graffio" di deformazioni (scratch-strain-gages), mediante i quali dovrebbe essere possibile misurare su tempi sufficientemente lunghi l'ampiezza delle variazioni dimensionali del legno provocate dai normali squilibri di U.R.

Con le limitazioni inerenti al loro carattere distruttivo, si rammentano infine i metodi viscosimetrici per la misura della depolimerizzazione della cellulosa, parametro fonda-

mentale per la valutazione dello stato dei supporti costituiti da tela o carta.

2 MATERIALI LAPIDEI

Una conoscenza approfondita delle condizioni dei materiali lapidei può essere ottenuta evidentemente solo attraverso la misura delle grandezze che sono maggiormente rappresentative del loro stato di conservazione.

Nel caso specifico dei beni culturali in pietra o marmo interessa soprattutto conoscere la composizione (qualitativa e quantitativa) degli strati superficiali eventualmente interessati dall'alterazione, la struttura porosa del materiale, le sue proprietà meccaniche, ecc.

Alcune di tali indagini possono essere eseguite in situ, mentre altre, che necessitano di attrezzature più sofisticate o comunque non trasportabili, devono essere eseguite in laboratorio su campioni prelevati dall'oggetto.

2 1 Misure eseguibili in situ

La metodologia da seguire per l'esecuzione dei controlli in situ della composizione chimica (con particolare interesse per i sali idrosolubili) è ancora da mettere a punto, ma si potrà giovare di attrezzature già esistenti sul mercato (bilance, spettrofotometri, colorimetri, conduttimetri, ph-metri portatili, ecc.), in particolare di quelle normalmente impiegate per l'analisi delle acque.

Un altro settore che richiede un lavoro di messa a punto è quello del controllo di eventuali lesioni interne mediante la misura della velocità di propagazione di onde elastiche. Tale metodo è ampiamente applicato a manufatti industriali moderni, ma è necessaria ancora tutta una serie di verifiche nel caso dei manufatti in pietra, più o meno eterogenei e in più o meno buono stato di conservazione.

La misura della durezza, in qualche modo legata alle proprietà meccaniche, può essere eseguita agevolmente con scler-

rometri portatili (tipo Schmidt), ma a tutt'oggi i risultati di tale misura non sembrano facilmente interpretabili. Occorrerà perciò individuare le grandezze da misurare in parallelo, e raccogliere una quantità di dati sufficienti a una interpretazione su basi statistiche del significato delle variazioni di questo parametro. A tale fine potrebbe essere utile mettere a punto delle prove semplici e possibilmente non distruttive, che valutino in qualche modo l'aderenza degli strati superficiali, più o meno alterati, alla pietra sottostante. Attualmente in Francia (CEBTP), viene usato un piccolo dinamometro portatile che misura lo sforzo necessario per staccare un disco di materiale superficiale. Il metodo potrebbe essere provato ed eventualmente modificato per renderlo più adatto alle esigenze particolari dei manufatti di interesse artistico o storico.

Non si è infine a conoscenza di metodi per il controllo in situ dello sfarinamento superficiale o di altre caratteristiche meccaniche della superficie (come ad es. la resistenza all'abrasione). Certamente utile sarebbe perciò un tentativo di verificare nel settore specifico l'applicabilità dei vari metodi di prova correntemente usati nell'industria a fini analoghi.

Un aspetto molto importante del processo di alterazione di un materiale lapideo è quello legato al trasporto dell'acqua entro la struttura porosa e quindi alle possibilità di penetrazione ed evaporazione dell'acqua stessa. Le tecniche di misura in situ della permeabilità all'acqua liquida attualmente impiegate sono poco precise, e sono state applicate finora soltanto a pietre molto porose nelle quali può penetrare una quantità così elevata di acqua da rendere trascurabile l'imprecisione della misura. La permeabilità al vapor d'acqua e all'aria viene comunemente misurata solo in laboratorio.

Tutto questo settore andrebbe quindi investigato per cercare di rendere più precise e di più vasta applicazione le tecniche attualmente disponibili, e per verificare l'applicabilità in situ di quelle finora effettuate solo su campioni asportati dal manufatto.

Esiste poi tutta una serie di misure, riguardanti le condizioni termoigrometriche dell'oggetto e dell'ambiente, di estremo interesse per la conoscenza delle cause di alterazione. In gran parte esse vengono già eseguite come normale routine, ma sarebbe molto opportuno rendere più facilmente operabili e più economiche le apparecchiature per la registrazione in continuo delle temperature e del contenuto di umidità, sia dell'oggetto che dell'aria circostante, così da evidenziare particolari fenomeni, come la condensazione o la turbolenza dell'aria, che provocano rispettivamente un aumento e una diminuzione del contenuto di acqua della pietra.

2 2 Misure eseguibili in laboratorio

La caratterizzazione precisa di un materiale litoido e del suo stato di conservazione, dal punto di vista della composizione mineralogica e chimica e delle proprietà fisiche, richiede l'impiego di tecniche analitiche più sofisticate di quelle applicabili in situ, ed è quindi necessario prelevare campioni dal manufatto in esame ed esaminarli in laboratorio.

Per l'analisi, sia del materiale inalterato sia delle parti che hanno subito trasformazioni più o meno importanti, ci si avvale normalmente delle metodologie specifiche del campo petrografico-mineralogico e di molte tecniche analitiche. Per la classificazione del materiale e per lo studio delle eventuali trasformazioni subite dalla pietra se ne preparano sezioni sottili per l'osservazione al microscopio polarizzatore e si eseguono analisi per diffrazione X. Tali tecniche sono ormai collaudate da molti anni di esperienza e risultano del tutto soddisfacenti. Per quello che riguarda la composizione chimica, sia della parte interna della pietra che degli strati più superficiali, si ricorre alla metodologia di analisi organica qualitativa e quantitativa; per lo studio delle superfici esterne è qualche volta necessario eseguire anche analisi organiche di eventuali materiali applicati nel passato a scopo protettivo, di prodotti metabolici della flora microbica che si può sviluppare sulla pietra, di idrocarburi pesanti in atmosfera inquinata, ecc. Di grande utilità si è rivelata anche la microscopia elettronica a scansione con microsonda.

Anche in questo settore le tecniche a disposizione sono collaudate, ma è evidente che è sempre possibile appor-
tare miglioramenti o variazioni che rendono i vari metodi più
adatti ai problemi particolari presentati da campioni prove-
nienti da opere d'arte (come per es. la quantità di materiale
disponibile per l'analisi).

La caratterizzazione della pietra dal punto di vista
fisico, strutturale e meccanico concerne la determinazione di
parametri quali il peso specifico apparente e reale; la poro-
sità totale e la distribuzione del volume dei pori in funzio-
ne del loro raggio; la resistenza a compressione, a trazione,
al taglio, ecc..

Anche se per questo tipo di misure ci si può avvale-
re dell'esperienza del settore geofisico e di quello della tec-
nologia dei materiali da costruzione, restano ancora aperti al-
cuni campi di ricerca, come per esempio la determinazione e lo
studio dell'area superficiale dei materiali lapidei, parametro
che certamente influenza in modo importante i processi di alte-
razione. Anche per la determinazione delle proprietà meccaniche
sarà necessario un lavoro di adattamento delle metodologie nor-
malmente impiegate in campo industriale alle quantità e dimen-
sioni dei campioni prelevabili da un manufatto artistico.

Come nel caso delle misure in situ è infine da ri-
cordare che anche per le misure eseguibili in laboratorio sarà
necessario elaborare una metodologia standard che renda con-
frontabili i risultati ottenuti da ricercatori diversi. E' evi-
dente che il primo passo in questa direzione va compiuto defi-
nendo con chiarezza i criteri da seguire nel campionamento del
materiale da esaminare, e normalizzando le tecniche del prelie-
vo.

3 MATERIALI METALLICI

Nel campo dei processi di alterazione dei materiali
metallici esiste una notevole massa di studi sulla definizione
delle caratteristiche chimiche, fisiche e tecniche dei materia-
li stessi, sull'interpretazione dei possibili meccanismi di de-
terioramento, e sulla simulazione dei processi di corrosione
artificiale.

Tuttavia l'insieme degli studi esistenti è polarizza-
to quasi esclusivamente sui problemi teorici o su applicazio-
ni di carattere industriale, e quasi mai fa riferimento ai
problemi di conservazione dei beni culturali.

Pertanto, lo studio e il rilevamento della corrosio-
ne dei beni culturali in metallo (ferro, ottone, bronzo), ri-
chiedono l'elaborazione di metodologie originali e specifi-
camente rivolte all'approfondimento dei seguenti temi di ri-
cerca.

- A) Caratterizzazione della patina di corrosione e della strut-
tura metallica sottostante. Tale problema è direttamente
connesso allo studio chimico e, ove possibile, metallogra-
fico della lega impiegata e di tutti gli elementi di qualifi-
cazione superficiale (agemina, niello, doratura).
- B) Caratterizzazione dello stato di conservazione "meccanico"
del manufatto, per evidenziare possibili cricche, zone di
frattura, aree sottoposte a sforzi meccanici.
- C) Messa a punto di prove di corrosione, e di apparecchiature
per l'invecchiamento artificiale, che riproducano e permetta-
no di analizzare, per quanto possibile, i processi di corro-
sione a lungo termine, quali sono in generale quelli cui sono
sottoposti i manufatti artistici.

Le tecniche e le strumentazioni per lo studio di strut-
ture e composizioni di leghe e patine, e dei processi di corrosio-
ne, sono molte e ben individuate (analisi metallografica; diffra-
zione X; spettrografia di emissione; assorbimento atomico; fluo-
rescenza X radioisotopica; radiografia X e gammagrafia; camera
a nebbia salina; camera di Kesternick; camera di invecchiamen-
to artificiale; metodi elettrochimici di studio della corrosio-
ne; metodi radiochimici con elementi marcati, ecc.).

Di non pochi dei metodi che si sono elencati si dovreb-
be tuttavia ricercare una più adatta applicazione al particolare
campo d'indagine, facendo in modo che essi rispondano all'esigen-
za fondamentale di poter seguire, anche su tempi molto lunghi,
la vicenda evolutiva dei beni oggetto di studio.

A seconda del tipo d'impiego a cui meglio si prestano, le tecniche di cui sembra più utile e urgente approfondire lo studio possono essere così ordinate:

- a) misure eseguibili in situ;
- b) misure eseguibili in laboratorio;
- c) misure e apparecchiature di cui deve essere valutata la applicabilità al campo della conservazione.

3 1 Misure eseguibili in situ

In via preliminare si rammenta che rientra in tale tipo di misure anche il rilevamento del microclima e in particolare di tutte quelle grandezze fisiche o composti chimici dell'atmosfera che possono influenzare lo stato di conservazione. Se non altro per i grandi manufatti metallici all'aperto, sarebbe perciò estremamente utile l'installazione, nelle loro immediate prossimità, di vere e proprie "stazioni sperimentali" di rilevamento, ovviamente consistenti in apparecchiature di minimo ingombro e dal funzionamento quanto più possibile semplice. Tali installazioni, oltre ai normali termoigrometri e a un certo numero di campioni metallici di riferimento, dovrebbero essere predisposte tra l'altro per il prelievo e l'analisi di alcuni componenti atmosferici "interessanti". L'analisi dei campioni dovrebbe essere eseguita anche con lo spettrometro di massa, al fine di individuare le molecole realmente presenti nell'atmosfera, e non solo i cationi ed anioni costituenti.

Le misure del microclima potrebbero essere corredate da altre misure fisiche, come per es. la "termovisione" e le misure di temperatura superficiale con sonde termiche.

L'approfondimento dell'analisi dei fattori ambientali dovrebbe permettere di riprodurre in laboratorio, in modo più realistico di quanto finora non sia stato fatto, le principali cause di deterioramento, e quindi di formulare ipotesi più precise sui meccanismi di corrosione e di ottenere campioni di prova deteriorati in modo sufficientemente reale.

A parte ciò, le misure direttamente eseguibili in situ si possono così riassumere:

- a) misure chimiche con kit portatili, per dosare eventuali inquinanti dannosi presenti nelle patine o componenti della lega resi solubili;
- b) misure di conduttività, per dosare i sali solubili presenti sulla superficie dei campioni;
- c) analisi di fluorescenza X radioisotopica delle patine e della lega metallica;
- d) analisi radiografica (x e gammagrafia), per verificare la stabilità meccanica dei getti di fusione (presenza di cricche, giunzioni, soffiature, ecc.);
- e) misure di temperatura della superficie (per i manufatti esposti all'aperto) e controllo termoigrometrico del microclima per identificare possibili fenomeni di condensazione;
- f) controllo macrofotografico delle superfici metalliche.

Di tutte le misure citate andrebbe elaborata una normativa specifica. Questa esigenza si avverte in particolare per le tecniche di ripresa macrofotografica, che a tutt'oggi rappresentano certamente il mezzo d'indagine più sicuro per documentare l'andamento dei fenomeni di corrosione, ma che il più delle volte non risultano utilizzabili appunto per la mancanza di accorgimenti che consentano una buona ripetibilità delle condizioni di ripresa.

3 2 Misure eseguibili in laboratorio

Le misure indicate ai punti 3 1 a, b, c, d, sono eseguibili in laboratorio, con apparecchiature non portatili; la misura 3 1 f è di carattere generale.

A queste misure si devono aggiungere:

- a) analisi diffrattometrica dei componenti della patina;
- b) analisi metallografica della lega;
- c) microscopia elettronica a scansione con microsonda, per osservazioni e analisi dispersiva in energia di raggi X di patine e leghe.

I primi due metodi d'analisi sono già sufficientemente standardizzati; l'impiego del microscopio elettronico a scansione agli scopi specifici è invece ancora in fase iniziale.

3 3 Misure e apparecchiature di cui deve essere valutata l'applicabilità al campo della conservazione

Tra i numerosi metodi che potrebbero essere elencati sotto questo titolo si citano quelli che sembrano di maggiore interesse e la cui applicabilità dovrebbe potersi verificare abbastanza agevolmente:

- a) misure di microdurezza, aderenza, spessore delle patine, al fine di valutare l'effettivo potere protettivo delle patine stesse;
- b) osservazioni radiografiche con apparecchiature portatili di potenza ridotta a visore con intensificatore d'immagini;
- c) misure con ultrasuoni, per il rilevamento di eventuali cricche o soluzioni di continuità non visibili;
- d) misure di spessori di patine con apparecchiature portatili che sfruttano il metodo delle correnti indotte.

4 METODI DI ANALISI DELLE ALTERAZIONI DI NATURA MICROBIOLOGICA

Sullo stato di conservazione dei beni di cui si è trattato nei paragrafi precedenti possono incidere, talora in misura rilevante, fattori microbiologici di deterioramento. Nelle pagine che seguono vengono passati rapidamente in rassegna i vari metodi disponibili per l'analisi di tali fattori.

4 1 Dipinti mobili e murali

Lo studio dei vari tipi di alterazioni microbiologiche che a cui sono soggetti i materiali costitutivi di questa classe di beni si vale principalmente di tecniche analitiche per l'identificazione dei microrganismi dannosi.

Le analisi dirette non distruttive si eseguono con l'ausilio di kit portatili opportunamente corredati con materiali sterili; sono eseguibili isolamenti a striscio su piastra, nonché isolamenti ad impatto con piastre contact-plate o, su aree di ancora più limitata estensione, con tampone.

Le modalità di prelievo non sono ancora ben definite, per le notevoli difficoltà derivanti dal fatto che i prodotti di alterazione sono generalmente presenti in quantità minime e si differenziano grandemente per qualità e aspetto.

Le normali metodologie microscopiche consentono di confermare o meno l'esame diretto e di distinguere la contaminazione dell'attecchimento. Per esami più approfonditi strumento elettivo è il microscopio elettronico, sia a trasmissione che a scansione.

Di un certo interesse, anche se i risultati fin qui ottenuti non sono del tutto soddisfacenti, la ricerca sull'eventuale possibilità di individuare gli attacchi biologici mediante registrazione fotografica su pellicola infrarossa a colori.

Di grande importanza sono ovviamente le operazioni colturali, mediante cui si perviene allo sviluppo dei microrganismi, alla loro numerazione e al loro isolamento. L'indagine metabolica dei ceppi microbici conduce alla riproducibilità del fenomeno che è la fase conclusiva della ricerca biologica, anche tramite l'ausilio di ricerche sulle misure respirometriche e sulle attività dei gruppi funzionali.

Le tecniche analitiche a cui si è accennato non sembrano peraltro del tutto idonee a chiarire i meccanismi di deterioramento, nonché il grado di vitalità dell'insediamento originario.

4 2 Materiali lapidei

L'aspetto più interessante e problematico del biodeterioramento di tali materiali è da porre in relazione all'attività di microrganismi appartenenti ai gruppi eterotrofo e autotrofo chemiosintetico.

Per quanto riguarda la tipizzazione delle relative forme di deterioramento (patina pulverulenta, croste, scalfitture della superficie, ecc.), esistono tecniche soddisfacenti anche se laboriose. Viceversa ancora da sviluppare sono le tecniche di evidenziazione dei solfobatteri per mezzo del microscopio a scansione, e gli studi sui prodotti metabolici elaborati dai microrganismi e versati sul substrato lapideo (un metabolita accertato frequentemente sui monumenti è l'acido ossalico). Tale problema potrà essere forse risolto con le tecniche delle biosintesi in coltura sommersa o superficiale, ben collaudate nel campo farmacologico.

Restano inoltre irrisolti alcuni problemi riguardanti la conoscenza dei cicli metabolici dei solfobatteri e nitrobatteri sui monumenti e le loro effettive influenze sul processo di alterazione.

In particolare occorrerebbe chiarire il ruolo della SO_2 sul ciclo dello zolfo operato dai solfobatteri. A tale proposito, l'uso di tecniche radiochimiche in ausilio alle normali tecniche analitiche organiche ed inorganiche sembra molto promettente.

4 3 Materiali metallici

La corrosione dei metalli dovuta a microrganismi avviene a volte per azione biochimica diretta, a volte per azione indiretta, come per esempio l'aerazione differenziale (le colonie batteriche cresciute sul metallo sottraggono porzioni della superficie metallica dal contatto con l'ossigeno, creando perciò una diversa aerazione superficiale in due zone limitrofe). La corrosione biochimica dei piccoli e grandi manufatti assume aspetti diversi, che vanno da un film sottile e superficiale, a concrezioni compatte o con soluzioni di continuità. In ambedue i casi appare difficile il rilevamento dell'attività

batterica sia ad un esame diretto che all'osservazione microscopica.

In questo settore, l'unica metodologia per il rilevamento dell'attività batterica (Ferrobatteri, Nitrobatteri, Solfobatteri) è subordinata alla messa a punto di tecniche di isolamento in coltura pura, da effettuarsi su terreni selettivi con tempi di coltura prolungati.

E' auspicabile che il problema della corrosione biochimica, che al momento manca di dati sperimentali, venga quanto prima affrontato con prove di corrosione ad opera dei predetti batteri in ambienti sperimentali e naturali.

B I B L I O G R A F I A E S S E N Z I A L E

Dipinti mobili e murali:

- 1) W. P. K. FINDLAY The Preservation of Timber, A. & C. Black, London, 1963
- 2) A. J. STAMM Wood and Cellulose Science, Ronald Press, New York, 1964
- 3) N. S. BROMMELLE and A. J. MONCRIEFF, Deterioration and Treatment of Wood, The Intern. Council of Mus., Amsterdam, 1969
- 4) A. J. STAMM in Conservation of Wooden Objects, vol. II, 1-11, I.I.C., London, 1971
- 5) P. MORA, G. URBANI in Problemi di Conservazione, p. 21, Bologna, 1973
- 6) U. PROCACCI The Great Age of Fresco, ecc., The Metropolitan Museum of Art, New York, 1968
- 7) T. STAMBOLOV, I. R. J. VAN ASPEREN DE BOER The Deterioration and Conservation of Porous Building Materials in Monuments, International Centre for Conservation, Roma, 1973
- 8) G. TORRACA, in Problemi di Conservazione, p. 37, Bologna, 1973
- 9) P. MORA Causes of Deterioration of Mural Paintings, International Centre for Conservation, Roma, 1974
- 10) ICOM, COMMITTEE FOR THE CARE OF PAINTINGS The Care of Paintings: Fabric Paint Support, in Museum, 3, 135, (1960)
- 11) S. KECK Report on the Mechanical Alterations of the Paint Film, Icom, Committee for the Care of Paintings, Bruxelles, 1967
- 12) G. URBANI in Problemi di Conservazione, p. 9, Bologna, 1973
- 13) A. CIOFI-LUZZATO e L. CONTI Improved Histochemical Techniques for the Study of Binding Media, etc., Science Tools, XXI, 2-3, 24, 1974

- 14) G. A. BERGER and H. I. ZELIGER Detrimental and Irreversible Effects of Wax Impregnation on Easel Paintings, Icom, Committee for Conservation, Venezia, 1975
 - 15) G. A. HEDLEY, Some Empirical Determinations of the Strain Distribution in Canvases, Icom, Committee for Conservation, Venezia, 1975
 - 16) V. R. MEHRA Further Developments in Cold Lining, Icom, Committee for Conservation, Venezia, 1975
 - 17) J. C. MACCAWLEY Diamond Cell Infrared Spectroscopy in the Analysis of Paints and Pigments, Icom, Committee for Conservation, Venezia, 1975
- Materiali lapidei:
- 18) F. RODOLICO Le Pietre delle Città Italiane, Le Monnier, Firenze, 1965
 - 19) S. Z. LEWIN The Preservation of Natural Stone, 1839-1965, An Annotated Bibliography, I.I.C. Art and Archaeology Technical Abstracts, 1, 185, (1966)
 - 20) T. STAMBOLOV, J. VAN ASPEREN DE BOER The Deterioration and Conservation of Porous Building Materials in Monuments. A Preliminary Review. ICOM Committee for Museum Laboratories, Bruxelles, 1967
 - 21) La Conservazione delle Sculture all'aperto, Atti del Convegno Int. di Studi, Bologna, 1969
 - 22) I.I.C. Contributions to the New York Conference on Conservation of Stone and Wooden Objects, 7-13 June 1970, London, 1971
 - 23) 1er Colloque International sur la deterioration des pierres en oeuvre, Atti del Convegno, La Rochelle, 1972

- 24) M. TABASSO LAURENZI, G. TORRACA Marmo-Materiali Lapidari, Problemi di Conservazione, Ed. Compositori, Bologna, 1969
- 25) Les essais sur beton par la méthode de l'auscultation dynamique, Rilem-Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Suppl. al n. 309-310, 1973
- 26) E. M. WINKLER Stone: properties, durability in man's environment, Ed. Springer, Verlag., Wien - New York, 1973
- 27) G. TORRACA Effetti dell'inquinamento atmosferico sui materiali da costruzione nei monumenti. Presentato al XXIX Congresso ATI, Firenze, 1974

Materiali metallici:

- 28) E. R. CALEY Analysis of Ancient Metals, Pergamon Press, Oxford, 1964
- 29) R. H. GREAVES, H. WRIGHTON Practical Microscopical Metallography, Chapman Hall, London, 1967
- 30) ART and ARCHAEOLOGY TECHNICAL ABSTRACTS 6, 201-283 (1967); 7, 279-366 (1968): The composition and structure of natural patinas, bibliografia a cura di S. Z. LEWIN e S. M. ALEXANDER
- 31) Art and Technology - A Symposium on Classical Bronzes, The MIT Press, Cambridge, 1970
- 32) G. ALESSANDRINI, B. PERUZZI, G. DASSU', F. SINISCALCO Il problema del deterioramento e della corrosione degli oggetti di scavo in rame e leghe di rame, XXVI Congresso Naz. ATI, L'Aquila, Settembre 1971, Memorie, 78-91, 1971
- 33) W. H. AILOR Handbook on Corrosion, Testing and Evaluation, J. WILEY, New York, 1971
- 34) H. LEIDHEISER The Corrosion of Copper, Tin, and their Alloys, J. WILEY, New York, 1971

- 35) R. CESAREO, M. MARABELLI, S. SCIUTI Non destructive analysis of ancient bronzes, Studies in Conservation, 18, 64-8P, 1973
- 36) M. K. KALASH Investigation on protective properties of artificial patina on bronze artifacts, Icom Committee for Conservation, IV Triennial Meeting, Venezia, Ottobre 1975
- Biodeterioramento:
- 37) C. GIACOBINI Nuove prospettive di ricerca e di studio della microbiologia delle opere d'arte, Atti della XLIX riunione SIPS, vol. 2°, 981, Siena, 1967
- 38) A. HARRY WALTERS and JOHN J. ELPHICK Biodeterioration of materials Microbiological and allied Aspects, vol. I°, Elsevier Publ., Amsterdam-London-New York, 1968
- 39) L. BARCELLONA, M. MONTE SILA Studio colturale su ceppi di solfobatteri isolati da monumenti calcarei esposti all'aperto, Nota I, Influenza temperatura, XXVI Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, 1971
- 40) M. BASSI, C. GIACOBINI Nuove tecniche di indagine nello studio della microbiologia delle opere d'arte, XXVI Congresso Nazionale ATI, L'Aquila, 1971
- 41) Ricerche relative al recupero dei dipinti danneggiati dall'alluvione di Firenze nel 1966, C.N.R., Quaderni de La Ricerca Scientifica, 81, Roma, 1972
- 42) A. HARRY WALTERS, E. H. HUECK-VAN DER PLAS Biodeterioration of Materials, vol. 2°, Applied Science Publ., London, 1972
- 43) L. BARCELLONA Studio dell'effetto sterilizzante delle radiazioni gamma su tavole dipinte, Congresso Internazionale sulle applicazioni dei metodi nucleari nel campo delle opere d'arte, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma-Venezia, 1973

- 44) C. BETTINI, C. GIACOBINI Problemi microbiologici dei dipinti di due tombe etrusche della Necropoli di Veio, XXIX Congresso ATI, Firenze, 1974
- 45) F. GALLO Recent Experiments in the Field of Disinfection of Book Materials, ICOM, Committee for Conservation, Venezia, 1975
- 46) I. SADURSKA, R. KOWALIK Some tests upon microbioresistance of adhesives used in archive and library materials conservation, ICOM, Committee for Conservation, Venezia, 1975

P A R T E T E R Z A

CONTRIBUTI DI RICERCA

10 UNA NUOVA TELA DA RIFODERO PER DIPINTI

P. Parrini
Soc. Montedison, Div. Petrolchimica
Centro Ricerche, Ferrara

UNA NUOVA TELA DA RIFODERO PER DIPINTIRiassunto

Il problema del rifodero dei dipinti sembra avviato alla soluzione con l'uso di una nuova tela che mentre permette l'incollaggio con gli adesivi tradizionali, offre un'eccezionale resistenza al "creep" e alte proprietà meccaniche ed elastiche.

Questa tela, prodotta utilizzando, alternativamente, fili di canapa e fili di "Kevlar", una fibra sintetica a base di poliammidi aromatiche, di eccezionali proprietà meccaniche, è stata esaminata in varie condizioni di sforzo anche per tempi molto lunghi (fino a 5000 ore).

Nel presente lavoro sperimentale, si dimostra che, una volta ben tesa, le variazioni dimensionali nel tempo sono praticamente trascurabili.

Vengono riportati infine, oltre alle proprietà delle fibre singole usate, anche confronti con altre tele di comune impiego.

1 PREPARAZIONE DELLA TELA

Le proprietà della fibra Kevlar, a base di poliammi di aromatiche, prodotta dalla Du Pont, sono note da alcuni an ni. Per gli scopi propostici sono sembrate particolarmente in teressanti sia l'elevata tenacità e resistenza meccanica (del l'ordine di quella dell'acciaio) unite ad una notevole legge- rezza (densità inferiore a quella del vetro), sia la grande resistenza allo scorrimento viscoso (creep). Fra le fibre sin tetiche organiche il Kevlar è certamente quella che resiste di più agli sforzi dovuti ad un carico costante.

All'inizio con tale fibra abbiamo preparato una tela con caratteristiche strutturali simili a quelle poi adottate definitivamente, costituita da solo Kevlar. Tale tela ha dato ottimi risultati nelle prove di resistenza di laboratorio ma ha presentato risultati scadenti nell'applicazione pratica, parti- colarmente per difficoltà di incollaggio con collanti tradizio- nali, necessari per non pregiudicare la vita nel tempo del dipin- to e per la reversibilità dell'operazione di rifodero. Questo primo insuccesso è stato attribuito alla scarsa igroscopicità della nuova fibra sintetica (2,4% contro 12% di assorbimento di acqua della canapa) ed alla scarsa affinità delle colle impiega- te.

E' stata allora preparata una tela che potesse ovvia- re all'inconveniente lamentato. Data l'esuberanza delle proprie- tà meccaniche del Kevlar, è stato pensato che l'introduzione nella tela di un filo di canapa avrebbe, come è avvenuto, evita- to od almeno grandemente ridotto le difficoltà di incollaggio senza perdere i vantaggi di resistenza meccanica e specialmente al creep della fibra sintetica.

Pertanto è stata preparata una tela alternando, sia in trama che in ordito, una fibra di Kevlar ed una di canapa, del- lo stesso titolo. La fibra sintetica è stata ritorta a 110 tor- sioni/metro.

La tela ottenuta ha assunto le caratteristiche struttu- rali riportate in tab. 1.

Tab. 1 - Caratteristiche strutturali della tela "Kevlar-Canapa"

PESO PER MQ.		= 234 g
ARMATURA		= Tela
N° DI FILI/CM	trama	= 6,3
	ordito	= 6,5
FILII COSTITUITI DA: KEVLAR da 1780 dtex		
	CANAPA da 1650 dtex (10 Ne)-	
	alternati 1:1	
TORSIONI	del Kevlar = 110 giri/metro del tipo Z	
DENSITA'	= 40,9 fili per cmq.	

2 PROPRIETA' MECCANICHE E RESISTENZA AL CREEP

Le caratteristiche fisiche delle singole fibre sono state misurate secondo i metodi ASTM. Le proprietà meccaniche, ottenute dalla media di 50 determinazioni, sono state misurate con un dinamometro Instron, dopo condizionamento di almeno 24 ore a 23°C e 65% di UR. Le proprietà elastiche sono state misurate dopo una deformazione imposta dell'1%.

Le caratteristiche della tela sono state determinate secondo quanto descritto in (1). Le proprietà meccaniche sono state misurate con un dinamometro Instron su strisce ritagliate sia nel senso della trama che in quello dell'ordito di 50 mm di larghezza e 350 mm di lunghezza. I valori riportati sono la media di 20 determinazioni (10 per tipo).

La resistenza al creep è stata misurata determinando la distanza fra due morsetti applicati alle estremità di una striscia di tela di 60 mm di larghezza e 300 mm di lunghezza mediante un catetometro. Le misure riportate sono la media di 10 determinazioni, sia nel senso della trama che nel senso dell'ordito, e sono state effettuate in ambiente condizionato; applicando al morsetto inferiore vari pesi in modo di effettuare uno sforzo di 1330 g/cm. o di 2000 g/cm. o di 2660 g/cm. Le determinazioni vengono effettuate subito dopo l'applicazione del carico (tempo 0) e poi a tempi crescenti (1 ora, 2 ore, 12 ore, ecc.).

Lo stesso è avvenuto per le misure di recupero alla deformazione (tempo 0 all'atto della cessazione del carico).

I valori di confronto sono stati ricavati dai dati riportati in (1).

3 RISULTATI E COMMENTO CRITICO

Le caratteristiche meccaniche della nuova tela sono riportate in tab. 2, in confronto con tele simili, almeno per la grammatura, di canapa, lino, vetro e polipropilene.

Come si può vedere la tela "Kevlar-canapa" presenta una tenacità ed un modulo elastico decisamente superiori ed

Tab. 2 - Caratteristiche meccaniche della tela "Kevlar-canapa" in confronto con tele di canapa (°), lino (°), vetro (°); e poli propilene (°). I valori ottenuti, tutti su tele non trattate sono medi fra trama ed ordito.

	Kevlar-canapa	Canapa	Lino	Vetro USA	Vetro Ital.	Polipropilene
Grammatura (g/mq)	234	286	234	203	214	232
Carico di rottura (kg/cm)	51,1	20	21,2	31,5	35	32,5
Tenacità (g/cm/g/mq)	218	80	91	155	163	140
Modulo elastico (Kg/cm)	2.450	121	20	412	152	50,5
Allungamento (%)	2,5	8,0	9,3	3,3	4,5	31,5
Recupero elastico immediato dopo una deformazione dell'1% (%)	50	77 (°°)		88 (°°)		91
Deformazione permanente (%)	10	14		3		0

(°) - I valori sono ripresi da (1)

(°°) - I valori delle proprietà elastiche vanno considerati come indicativi, dato che le altre tele esaminate sono state in genere trattate con collanti, cere, ecc, mentre la tela di canapa-Kevlar non ha subito alcun trattamento.

un allungamento molto contenuto. Per quanto riguarda le proprietà elastiche, queste, ad un primo esame, sembrano inferiori a quelle della canapa, oltre che a quelle delle tele di vetro e di polipropilene, materiali notoriamente molto elastici. È presumibile però, anche alla luce delle caratteristiche delle singole fibre, riportate in tab. 3, che questo sia dovuto ad un cattivo tensionamento del provino nella misura, per cui una prima parte della deformazione non arriva ad interessare le fibre che la compongono, ma semplicemente la struttura della tela. D'altra parte questa non ha subito nessun trattamento di fissaggio con colle, resine, ecc. Il fenomeno sembra essere confermato dalle successive misure di creep. È molto probabile che per quanto riguarda le caratteristiche elastiche, la nuova tela abbia proprietà intermedie fra quelle del Kevlar, e quelle della canapa, anzi molto spostate verso la prima.

Che le ottime proprietà derivino principalmente dalla nuova fibra sintetica, lo si può dedurre dalle caratteristiche riportate in tab. 3, dove il Kevlar e la canapa vengono confrontati con una fibra di vetro ed una d'acciaio.

A parte il fatto che la densità del Kevlar è la minore, la sua tenacità è superiore anche a quella dell'acciaio, così come la sua rigidità. Per quanto riguarda le proprietà elastiche, il recupero elastico della fibra organica è di gran lunga superiore a quello della canapa ed uguale a quello del vetro e dell'acciaio. Il rilassamento allo sforzo è invece leggermente inferiore alle due fibre inorganiche. Da notare infine l'ottimo comportamento all'acqua.

Le proprietà delle singole fibre che compongono la nuova tela e quelle della tela stessa fanno prevedere un ottimo comportamento al creep. Questa ipotesi è verificata dalle misure di resistenza allo scorrimento viscoso, particolarmente prolungate, nel tempo, i cui risultati sono riportati in tab. 4 e nelle Fig. 1 e 2. Le misure sono state effettuate con tre carichi differenti due dei quali superiori a quelli usati sulle tele di confronto (2000 g/cm e 2660 g/cm).

Come prima considerazione si può constatare come la deformazione sotto carico non sia influenzata dal peso (dopo

Tab. 3 - Caratteristiche fisiche delle singole fibre componenti la tela mista "Kevlar-canapa", in confronto ad alcune delle più significative, utilizzate per il rifodero

	Kevlar	Canapa	Vetro	Acciaio
Titolo (dtex)	1.780	1.580	3,5	2.960
Densità (g/cm ³)	1,44	1,50	2,5	7,85
Tenacità (g/dtex)	17,1	1,7	8,4	3,2
Carico di rottura (Kg/mm ²)	247	26	210	251
Allungamento (%)	2,4	1,7	3,2	2,2
Modulo elastico (g/dtex)	715	100	277	179
Recupero elastico all'1% di deformazione (%)	99,7	35	99,7	99,4
Rilassamento, dopo 60', alla deformazione dell'1% (%)	92	67	100	98
Resistenza alla flessione (n° di cicli)	2.280	120	0	-
Tenacità dopo 24 ore in acqua (g/dtex)	17,1	1,6	8,2	-

Tab. 4 - Deformazione percentuale, a carico costante, subita dalla tela "Kevlar-canapa", a 23°C e 50% UR

Tempo di applicazione del carico, ore	0			24			72			168			320			600						
	1330 g/cm	2000 g/cm	2660 g/cm	1,03	1,08	1,25	1,08	1,14	1,32	1,10	1,15	1,35	1,11	1,16	1,37	1,11	1,16	1,37	1,12	1,16	1,37	
Carico applicato																						

600 ore si passa da un allungamento di 1,12 ad uno di 1,37 pur con il raddoppio del carico applicato). Nel caso di una tela di sola canapa, il raddoppio del carico applicato porta ad un aumento della deformazione del 100% (1). Questo fa pensare che il creep misurato sia in realtà molto piccolo e che buona parte di esso sia dovuto all'assestamento della tela all'atto dell'applicazione del carico. In effetti, anche l'andamento dei grafici di Fig. 1 e 2 può giustificare un'affermazione del genere.

Rispetto alle altre tele l'andamento del creep della nuova composizione Kevlar-canapa, è decisamente favorevole sia per la scarsa deformazione, sia anche per il molto più lungo tempo di applicazione del carico. Infatti le prove di creep sono state spinte fino a 5000 ore, cioè per un periodo giudicato più che sufficiente per dare una indicazione sicura sul comportamento nel tempo (1). In questo tempo l'aumento della deformazione è praticamente inesistente (vedi fig.2) raggiungendo la tela i valori di allungamento entro le prime 100 ore di carico ed in maggioranza entro i primi momenti dall'applicazione del carico.

Da notare l'immediato ricupero della maggior parte della deformazione all'atto della cessazione del carico, il che indica una buona elasticità della struttura che non è stata permanentemente deformata dal lungo periodo in cui è rimasta sotto sforzo. Questo comportamento ci sembra particolarmente favorevole per lo scopo per cui è stata costruita. Pertanto dall'esame delle caratteristiche di resistenza al creep si deduce che la nuova tela sembra particolarmente adatta al rifodero, dopo aver subito un giusto tensionamento all'atto dell'operazione.

In confronto con le tele di canapa la deformazione della nuova tela è almeno tre volte più piccola, ed ancora di più in paragone con le tele di polipropilene citate in (1) dato che quest'ultima fibra, malgrado l'eccellente elasticità immediata non ha buona resistenza al carico costante. Se si paragona con la tela di vetro, senza considerare altre proprietà come il peso e la possibilità di adesione, la tela Kevlar-canapa presenta una deformazione di circa l'1% contro lo 0,4, differenza che può essere eliminata facilmente con opportuno tensionamento. I vantaggi però della nuova tela sono mol-

to superiori: si pensi alla leggerezza, maneggevolezza ed alla facilità di incollaggio che essa presenta.

4 CONCLUSIONI

Utilizzando le proprietà meccaniche ed elastiche eccezionali della fibra aramidica della Du Pont e le caratteristiche, ormai collaudate da secoli, della canapa, è stata preparata una tela mista 50:50 che si presenta particolarmente favorevole per l'operazione di rifoderò. Essa infatti non dovrebbe avere problemi di adesione alla vecchia tela cellulosica degradata anche con collanti tradizionali, ma dovrebbe essere in grado di fornire, grazie al Kevlar, una struttura tenace ed indeformabile anche per tempi molto lunghi. Un tale accoppiamento di vecchio e di nuovo sembra aver portato alla realizzazione di un materiale perfettamente rispondente alle esigenti richieste della moderna scienza della conservazione.

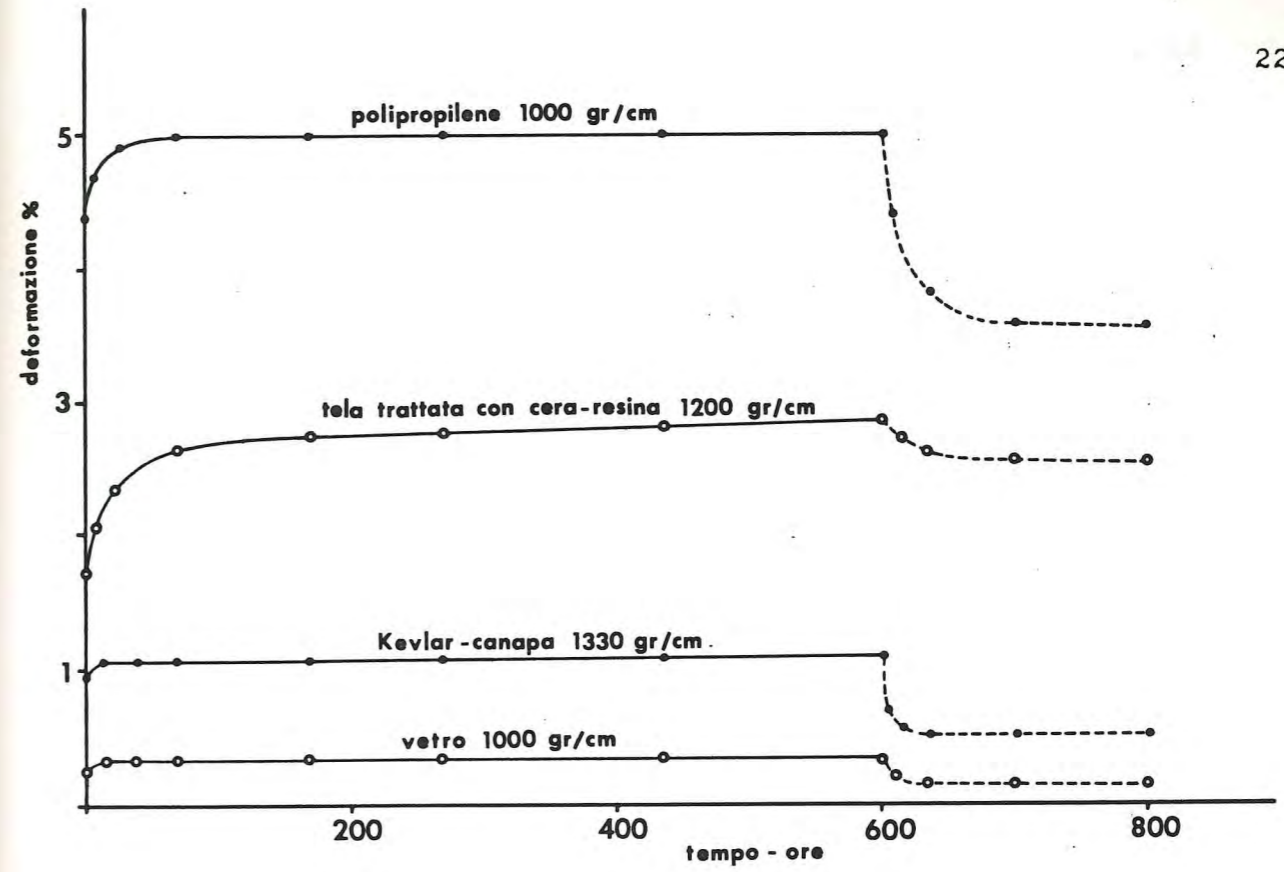


fig. 1

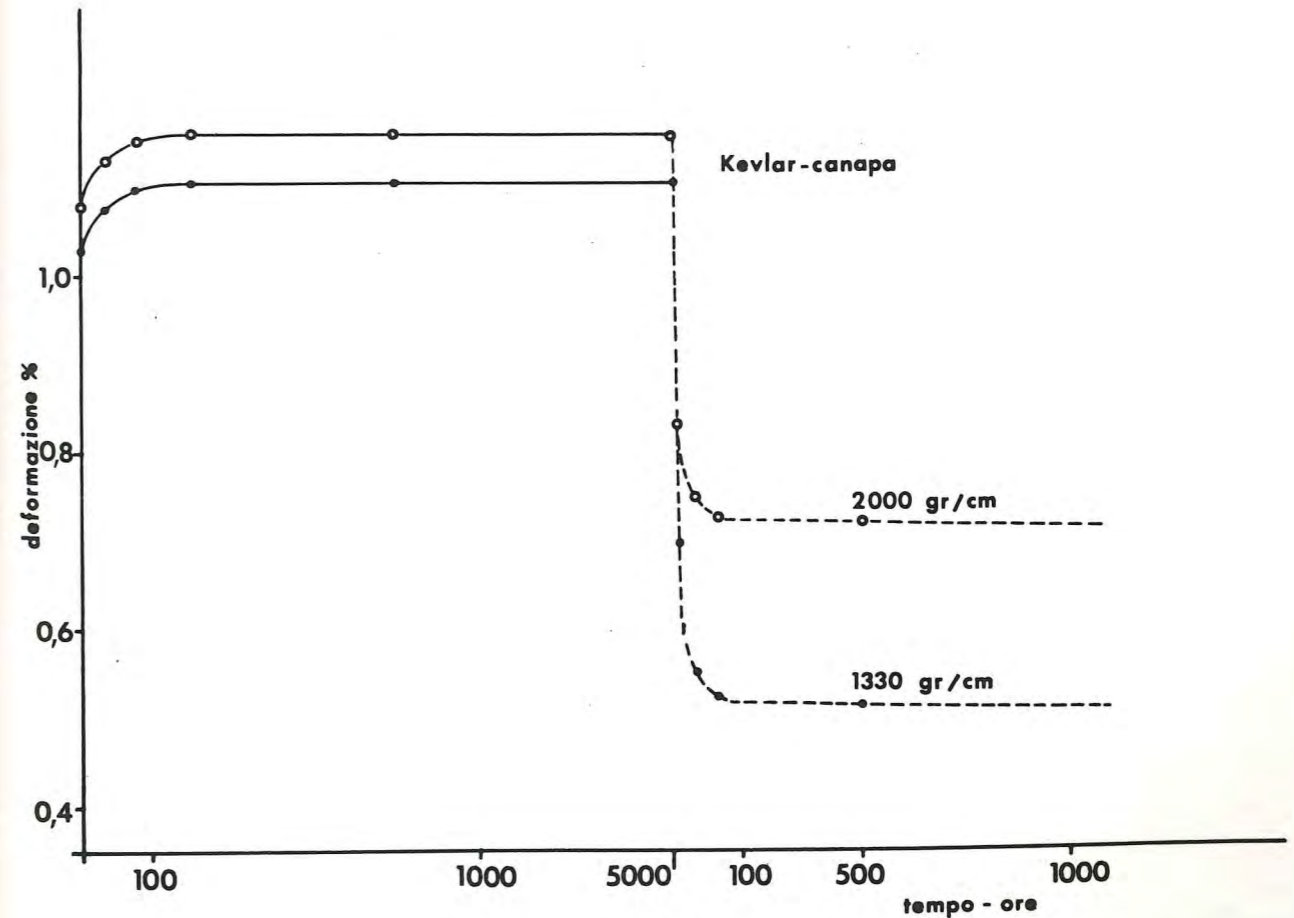


fig. 2

BIBLIOGRAFIA

- (1) E. TASSINARI, Metodi di caratterizzazione delle tele di rifodero, in "Problemi di conservazione" (141-165), Atti della commissione per lo sviluppo tecnologico della conservazione dei Beni Culturali - Bologna, 1973.
- (2) W. CONTI - E. TASSINARI, Misure di creep su tele di rifodero, in "Problemi di conservazione" (167-181) - op.cit., 1973.
- (3) E. TASSINARI, Studio preliminare sul tensionamento delle tele da rifodero, in "Problemi di conservazione" (183-192) op. cit., 1973.
- (4) E. SORTA, Studio preliminare sulla determinazione del modulo elastico di tele dipinte con metodo non distruttivo, in "Problemi di conservazione" (193-195) - op. cit., 1973.

RILASSAMENTO DEGLI SFORZI E INSTABILIZZAZIONE
INCIPIENTE IN MODELLI DI TELE DI RIFODERO TENSIONATE

1. INTRODUZIONE

E' noto come le tele di rifodero vadano soggette alla formazione delle cosiddette "borse". Tali borse sono dovute al rilassamento viscoelastico degli sforzi sotto l'azione del peso proprio del sistema tela + quadro.

Recenti indagini sperimentali (1) mostrano che la "Creep Compliance" di un tipico campione di tela di rifodero può essere scritta nella forma:

$$J(t) = J_e + J_v t^\alpha \quad (1)$$

dove J_e è la "Compliance istantanea" e $J_v e \alpha$ vanno connesse alla risposta viscoelastica del materiale. In tutti i casi considerati dagli autori citati, α si mantiene prossima al valore 1/3.

La (1) riproduce nella forma la ben nota funzione di Creep di Andrade.

J_e e J_v assumono valori diversi a seconda che il carico venga applicato lungo la trama o l'ordito.

Nel seguito vengono utilizzati gli elementi di informazione contenuti nella (1) al fine di prevedere le condizioni di incipiente instabilità in termini di effetti locali di scarico degli sforzi. Si considerano due possibili metodi di tensionamento, a scopo di esemplificazione:

- 1) campione rettangolare tensionato verticalmente con lati orizzontali rigidamente vincolati
- 2) campione rettangolare tensionato verticalmente e rigidamente vincolato su tutti i lati.

Si assumerà che la direzione verticale coincida con una delle direzioni principali della tela (ordito o trama).

Introduciamo ora un modello meccanico semplice di tela di rifodero.

Da un punto di vista meccanico una tela va considerata come una struttura bidimensionale avente caratteristiche fortemente anisotrope. Si potrebbe introdurre un modello generale anisotropo, ma si otterrebbero equazioni non solubili ana

liticamente. Per il momento si farà riferimento ad un modello strutturale più semplice. Precisamente assumiamo che la nostra tela si possa approssimativamente rappresentare come una membrana a componenti di spostamento ortogonali disaccoppiate. Denotando con x e y le coordinate rispettivamente orizzontale e verticale (asse y diretto verso l'alto) del campione di tela considerato, otteniamo la seguente equazione differenziale di equilibrio (limitandoci per il momento ad una analisi elastica):

$$\beta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2)$$

dove β è la "rigidità" della tela e u è lo spostamento orizzontale;

$$\beta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = p \quad (3)$$

dove p è il peso per unità di superficie della tela e v è la componente di spostamento verticale.

Inoltre si deve avere presso i bordi liberi:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

$\frac{\partial u}{\partial n}$ e $\frac{\partial v}{\partial n}$ essendo le derivate secondo la direzione normale alla linea di contorno della tela. Una estensione viscoelastica delle (2-4) è immediata.

2 CAMPIONE RETTANGOLARE TENSIONATO CON I LATI ORIZZONTALI RIGIDAMENTE VINCOLATI

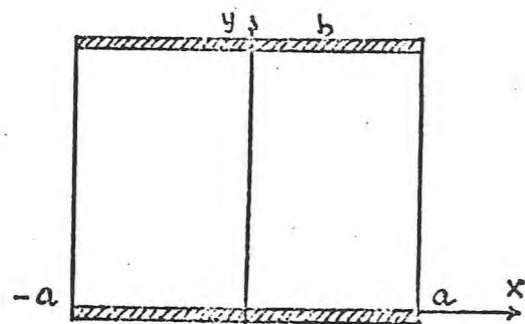


Fig. 1

Consideriamo un campione verticale avente dimensioni $2a$ e b (si veda Fig. 1). Assumiamo che il detto campione sia stato uniformemente predeformato secondo l'asse verticale in modo tale da avere:

$$\begin{aligned} v(x, b) &= \varepsilon b & \text{per ogni } t \geq 0 \\ v(x, 0) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

dove il tempo t viene misurato a partire dall'istante di tensionamento.

Calcoliamo dapprima la distribuzione di spostamenti e deformazioni immediatamente dopo l'applicazione della deformazione. Sotto queste condizioni la risposta del materiale, essendo puramente elastica, è completamente caratterizzata dal termine istantaneo J_e della "Creep Compliance". Scriviamo pertanto (si vedano le equazioni (1-4)), $\beta = 1/J_e$.

Le condizioni al contorno lungo i lati orizzontali sono date dalle (8), mentre lungo i lati verticali occorre che si abbia:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (x = \pm a) \quad (9)$$

La soluzione della (3) che soddisfa a tutte le condizioni al contorno è:

$$v = p \frac{J_e}{2} y (y-b) + \varepsilon y \quad (10)$$

La condizione di stabilità $\frac{\partial v}{\partial y} \geq 0$ richiede che si abbia

$$\varepsilon - p \frac{J_e}{2} (b - 2y) \geq 0 \quad (11)$$

ovunque nel campione. Occorre pertanto che sia $\varepsilon > p \frac{J_e}{2} b$.

Appena la deformazione viene applicata, ha inizio il processo di rilassamento. La costante di forza β va ora sostituita con il modulo di rilassamento $\beta(t)$ (2). Si ottiene così la equazione di equilibrio viscoelastica:

$$\int_{-\infty}^t \beta(t-\tau) \frac{d}{d\tau} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] d\tau = 0 \quad (12)$$

dove $\beta(t)$ può essere calcolata dalla Creep Compliance (1). Conoscendo ora le condizioni al contorno e la storia di deformazio-

ne del campione possiamo risolvere la (12), per esempio con la trasformata di Laplace (3). Come risultato otteniamo lo sforzo verticale in funzione del tempo

$$f(t) = \varepsilon \beta(t) + \frac{p}{2} (2y - b) \quad (13)$$

L'instabilità si manifesta quando $f(t) \leq 0$ in qualche punto della tela. Dalla (13) risulta che lo scarico degli sforzi si manifesta dapprima alla base del campione. Il tempo critico di scarico t_0 si ottiene dalla

$$\varepsilon \beta(t_0) - \frac{1}{2} p b = 0 \quad (14)$$

La (14) ammette soluzione unica in quanto $\beta(t)$ è funzione monotona decrescente di t . Assumendo (condizione senz'altro verificata nella pratica) che $\varepsilon/J_e \gg \frac{p}{2}$, $\beta(t_0)$ può essere scritta omettendo il contributo del termine di elasticità istantanea, per cui, dalle connessioni fra funzioni viscoelastiche (4), otteniamo:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{J_v} \frac{\sin \pi \alpha}{\pi \alpha} t_0^{-\alpha} \quad (15)$$

che, sostituita nella (14), ci dà il tempo critico (caso $\alpha = \frac{1}{3}$)

$$t_0 = \left(\frac{3 \sqrt{3} \varepsilon}{\pi J_v p b} \right)^3 \quad (16)$$

3 CAMPIONE RETTANGOLARE PRETENSIONATO E RIGIDAMENTE VINCOLATO LUNGO I QUATTRO LATI

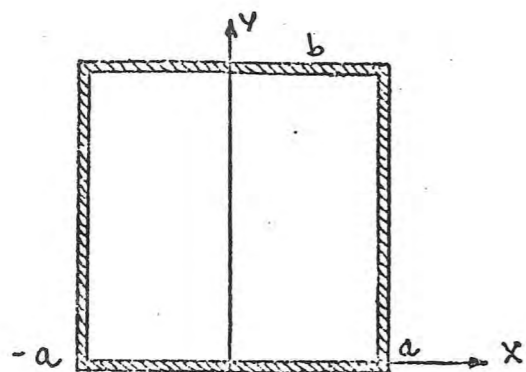


Fig. 2

La semplice analisi matematica sviluppata nel capitolo precedente mostra che ogni problema viscoelastico può essere trasformato in un equivalente problema elastico, purché si faccia uso delle trasformate di Laplace (o di Fourier). Perciò anche in questo caso risolveremo dapprima il problema elastico. Come risultato di questo calcolo preliminare, otteniamo la distribuzione di sforzi e spostamenti, immediatamente dopo l'applicazione del pre-carico.

Le condizioni al contorno sono ora:

$$v(x, 0) = 0 \quad (17)$$

$$v(x, b) = \varepsilon b \quad (18)$$

$$v(\pm a, y) = \varepsilon y \quad (19)$$

Risolvendo la equazione di equilibrio (3) con il metodo della separazione delle variabili, otteniamo il campo degli spostamenti verticali;

$$v(x, y) = \frac{1}{2} p J_e (y^2 - by) + \varepsilon y + \frac{1}{2} p J_e Q(x, y) \quad (20)$$

dove $Q(x, y)$ è dato da

$$Q(x, y) = \frac{8b^2}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^3} \left(\frac{\cosh \frac{n\pi x}{b}}{\cosh \frac{n\pi a}{b}} \right) \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (21)$$

Passando ora alla estensione viscoelastica, otteniamo durante il rilassamento:

$$v(x, y, t) = \frac{1}{2} J(t) p [Q(x, y) + y^2 - by] + \varepsilon y \quad (22)$$

Ricaviamo inoltre lo sforzo:

$$f(t) = \frac{1}{2} p \left[\frac{\partial Q}{\partial y} + 2y - b \right] + \varepsilon \beta(t) \quad (23)$$

Uguagliando a zero la (23) e risolvendo rispetto a t per $y = 0$ si ottiene il tempo critico per l'instabilità incipiente del campione.

4 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Nel caso del campione non vincolato lateralmente otteniamo il tempo critico nella forma:

$$t_0 = \left(\frac{3 \sqrt{3} \varepsilon}{\pi J_v p b} \right)^3$$

dove ε è la pre-deformazione alla quale il campione è stato sot-

toposto, J_v è la costante associata alla funzione di Creep (J_v espresso in $\text{cm kg}^{-1} \text{ ore}^{-\frac{1}{3}}$), p è il peso per unità di superficie del sistema tela + quadro (in kg/cm^2) e b è l'altezza del campione.

Scegliendo:

$$\varepsilon = 10^{-2}, \quad b = 10^2 \text{ cm}, \quad p = 10^{-3} \text{ kg/cm}^2,$$

$$J_v = 0,0018 \text{ cm kg}^{-1} \text{ ore}^{-\frac{1}{3}} (*),$$

e sostituendo nella formula che ci dà t_0 , otteniamo $t_0 \approx 7.3 \times 10^5$ ore, ossia $t_0 \approx 90$ anni.

Aumentando l'altezza b del campione a 2 metri, il tempo critico t_0 si riduce a dieci anni e mezzo. D'altro canto, riducendo b a 50 cm, otteniamo $t_0 \approx 700$ anni. Questi risultati mostrano che la dimensione verticale del dipinto ha una grande importanza. Il peso p per unità di superficie gioca pure esso un ruolo determinante. Riducendo p di un fattore due, il tempo t_0 risulta moltiplicato per otto.

Ci apprestiamo ora a valutare l'influenza delle condizioni al contorno sui due bordi verticali. Con riferimento ad un campione rigidamente vincolato su tutti i suoi lati, facciamo ora uso della soluzione analitica (21-23).

Mantenendo la dimensione verticale del quadro fissa ed uguale 10^2 cm, abbiamo scelto tre valori diversi per la larghezza: 20 = 60, 100 e 160 cm.

I risultati mostrano che lo scarico degli sforzi si manifesta dapprima alla base della tela sull'asse di mezzzeria. Il "tempo a instabilità" t_1 è generalmente più lungo di quello associato al campione non vincolato lateralmente.

In Fig. 3 il tempo di scarico $t_1(y)$ è riportato per tutti i punti appartenenti all'asse di simmetria, in funzione della distanza y dalla base del quadro.

* - dai dati di Conti-Tassinari, (1) riferentisi a un campione stirato lungo la direzione dell'ordito (umidità relativa 65%)

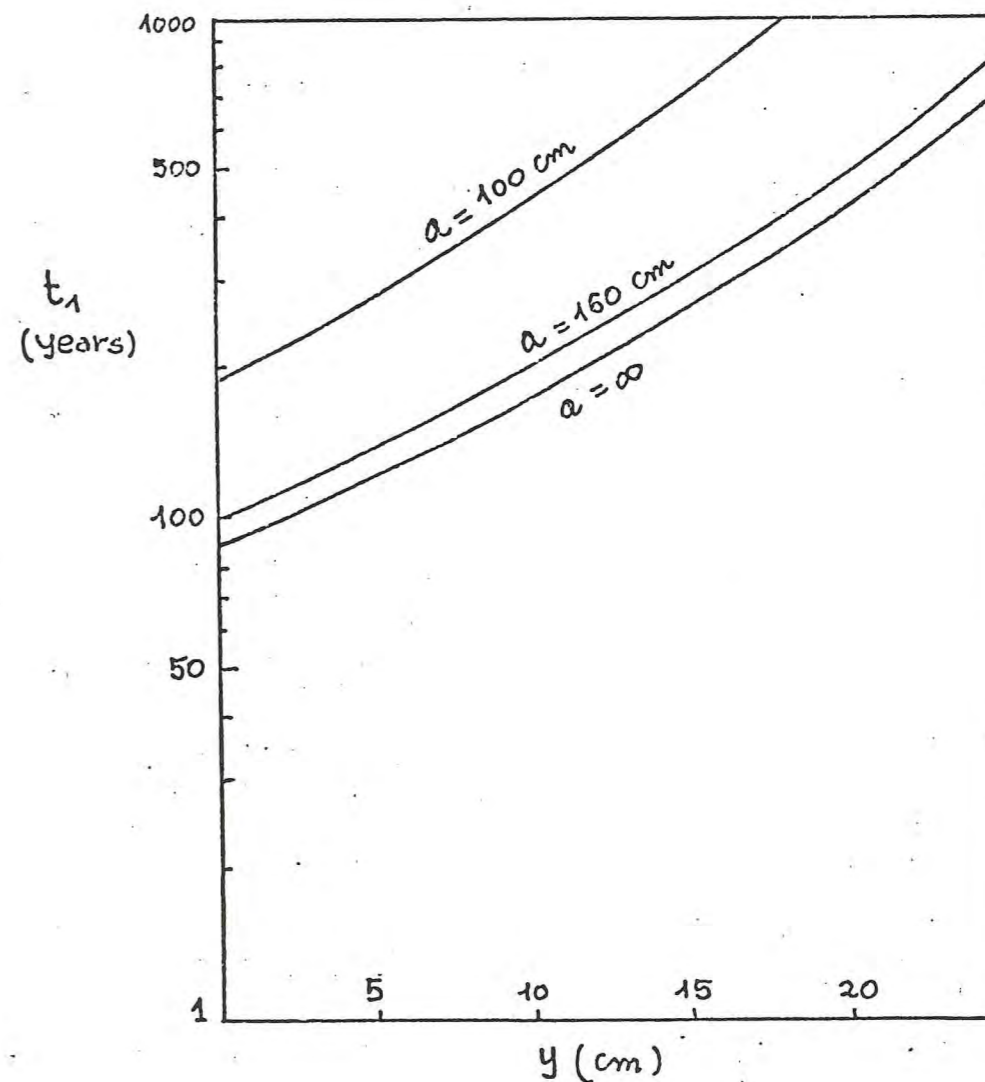


Fig. 3

Ponendo $2a = 160$ cm, otteniamo un tempo critico per instabilizzazione incipiente di 99,4 anni (praticamente coincidente con il risultato a bordi liberi). D'altro canto per $2a = 100$ cm abbiamo $t_1 = 190$ anni e con $2a = 60$ cm si ottiene $t_1 = 6300$ anni. Questi risultati mostrano chiaramente che un condizionamento laterale efficace della tela può accrescere il tempo critico in modo sostanziale ogni qualvolta la dimensione verticale del quadro prevale sulla larghezza.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I risultati discussi nel capitolo precedente mostrano che il problema di vincolare una tela di rifodero in modo da ottenere il massimo "tempo a instabilizzazione" è particolarmente critico, tanto che un procedimento adatto può accrescere l'efficacia della stabilità viscoelastica di un intero ordine di grandezza. D'altro canto una tale conclusione implica che il modello è estremamente sensibile anche a variazioni dei parametri che descrivono le proprietà del materiale, per cui una analisi basata su un modello meccanico più realistico di tela di rifodero sembra fortemente consigliabile.

R I F E R I M E N T I

- (1) W. CONTI - E. TASSINARI, Misure di Creep su una tela di rifodero trattata con colla - Milano, 1974
- (2) J. CHRISTIANSEN, Theory of Viscoelasticity, Academic Press - New York, 1971
- (3) G. F. CARRIER - M. KROOK - C. F. PEARSON, Functions of a Complex Variable, Mc. Graw Hill - New York, 1966
- (4) J. D. FERRY, Viscoelastic Properties of Polymers, Wiley - New York, 1970

P A R T E Q U A R T A

PROPOSTE DI RICERCA

12 PROPOSTA DI UNA RICERCA SUL CONTENUTO DI UMIDITA'
E SUI DIFETTI D'ADESIONE DI INTONACI AFFRESCATI

J.F. Asmus
H.T. Newton
M. Seracini

O PREMESSA

Uno dei punti che rivestono maggiore importanza per la conservazione ed il trattamento dei dipinti murali è la rilevazione e la caratterizzazione precoce di cambiamenti che avvengono nelle strutture interne. Infatti, allorché sulla superficie della pittura murale risultino visibili dell'umidità, delle fratture, dei distacchi o dei processi di mineralizzazione, sono già avvenuti gravi danni interni, rendendo quindi molto più arduo il restauro.

Inoltre per poter programmare una metodologia di intervento più efficace, è necessario avere una completa conoscenza della morfologia e delle dimensioni del dipinto e del muro. Varie tecniche possono essere usate a questo scopo. Raggi X, raggi γ o elettroni accelerati potrebbero offrire delle buone possibilità. La conducibilità elettrica è un'altra alternativa che si è già dimostrata molto utile.

Ultimamente una nuova tecnica per l'esame di materiali ha trovato grande impiego in vari campi di ricerca e nell'industria. Tale tecnica si basa sull'uso di onde ultrasoniche le quali risultano particolarmente sensibili a variazioni interne della densità e della compattezza di un materiale. Inoltre, scegliendo delle lunghezze d'onda particolarmente elevate, è possibile fare delle rilevazioni a grandi profondità, come per esempio negli studi sismici della struttura della terra. Di conseguenza, questa capacità di penetrazione, unita ad una particolare sensibilità nel rilevare manufatti strutturali, dà una indicazione delle notevoli possibilità applicative degli ultrasuoni per l'analisi delle condizioni dei dipinti murali. Resta peraltro da determinare una frequenza che permetta di bilanciare la sensibilità del segnale con la sua penetrazione. Inoltre, si rende necessario lo sviluppo sia di nuove tecniche per la trasmissione e la ricezione di onde ultrasoniche, sia di nuovi procedimenti di elaborazione e di interpretazione dei segnali ricevuti.

Il presente progetto si propone di rispondere a quei quesiti che si pongono nella valutazione e nello sviluppo di procedimenti atti a caratterizzare i dipinti murali per

mezzo di ultrasuoni. Ciò includerà: la determinazione delle frequenze ottimali, tenendo conto delle varietà di condizioni incontrate; la risoluzione spaziale del sistema di rilevamento; lo studio della tolleranza del rumore generato dall'ambiente circostante; lo studio di un sistema di elaborazione dei segnali e di tecniche di analisi; la descrizione di metodi di applicazione dei trasduttori ai dipinti murali.

1 SENSIBILITA' DEL METODO

La parte più importante del sistema ultrasonico per lo studio dello stato di un dipinto murale, si basa sulla possibilità di rilevare i deboli segnali riflessi da disomogeneità strutturali. Per ottenere una risoluzione spaziale che possa rivelare imperfezioni e livelli di umidità minimi, è desiderabile usare delle onde ultrasoniche le cui lunghezze siano molto più piccole delle dimensioni delle imperfezioni stesse. Di conseguenza, se vogliamo rilevare dei distacchi di intonaco dell'ordine di 1 cm., sarebbe plausibile usare degli ultrasuoni con una lunghezza d'onda che oscilli fra 1 mm ed 1 cm. Per quanto si riferisce alla frequenza, possiamo rifarci ai dati rilevati sul cemento armato, di cui si conoscono le proprietà ultrasoniche.

Nel cemento armato la velocità acustica longitudinale è approssimativamente di $3,1 \times 10^5$ cm/sec. La scelta delle frequenze ultrasoniche da usarsi per il rilevamento di tali manufatti, varierà quindi fra 0,31 e 3,1 MHz.

Comunque, il rapporto fra lunghezza d'onda degli ultrasuoni e irregolarità interne, non è l'unico elemento che condiziona la scelta della frequenza. Molti anni di sperimentazione con ultrasuoni hanno dimostrato che materiali porosi, soffici o non omogenei, limitano la penetrazione degli ultrasuoni.

Riflessioni interne e/o fenomeni di assorbimento sono le cause della perdita di intensità ultrasonica rispetto alla distanza di propagazione (1). In generale, si può affermare che le onde con frequenza più alta sono attenuate

molto più rapidamente di quelle di frequenza inferiore. Per questa ragione le sperimentazioni ultrasoniche non distruttive su materiali quali cemento armato, plastica, gomma o porcellana, vengono effettuate usando delle frequenze nel campo dei KHz, piuttosto che dei MHz.

Non esistono molti dati relativi all'attenuazione associata a materiali non omogenei, come il cemento armato, il mattone o la pietra. Comunque, è stato determinato (2) che nella quarzite le onde con frequenza di 1 MHz sono attenuate di 100 dB/m.

Materiali non omogenei da costruzione (cemento armato e mattoni) sono già stati analizzati con successo nella loro struttura, per mezzo di ultrasuoni (3). È stato rilevato che per muri di un certo spessore (circa 50 cm.), la attenuazione è accettabile, e cioè rimane nell'ordine di 100 dB/m, se vengono usate delle frequenze che vanno da 25 a 100 KHz. Nel caso invece di muri costruiti con materiali particolarmente densi, degli ultrasuoni con frequenze di 250 KHz riescono a penetrare spessori di un metro.

Questi dati suggeriscono dunque che, segnali con frequenze inferiori ai 300 KHz, dovrebbero raggiungere una notevole profondità. In generale, difetti in un dipinto murale o nei suoi sottostrati, daranno luogo ad una riflessione ultrasonica:

$$R = \left(\frac{m - 1}{m + 1} \right)^2$$

e a una trasmissione:

$$T = \frac{4m}{(m+1)^2}$$

Il parametro m è dato da:

$$m = \frac{z_2}{z_1} = \frac{\rho_2 \cdot c_2}{\rho_1 \cdot c_1}$$

che si riferisce alle proprietà sia del materiale che delle imperfezioni.

Come l'umidità localizzata avrà un effetto sostanziale sulla densità ρ , così anche i gradienti di umidità daranno luogo a riflessione di onde.

Se per esempio, sostituiamo le proprietà del materiale considerato con quelle del cemento armato, e le proprietà dell'imperfezione con quelle della gomma rigida, otteniamo:

$$R = 0,44$$

$$T = 0,56$$

Questi dati rappresenterebbero i valori teorici dei segnali ultrasonici originati da una deformazione di 1 cm.

Degli esperimenti sono già stati effettuati per rilevare le caratteristiche interne di un muro di cemento armato. Due trasduttori piezoelettrici sono stati applicati al muro. Il primo trasduttore trasformava segnali provenienti da un oscilloscopio in impulsi ultrasonici. Il secondo trasduttore riceveva i segnali riflessi e li immetteva sullo schermo dell'oscilloscopio.

Simultaneamente, l'eco veniva registrato da un "transient recorder", e quindi trasferito in un computer. Questo effettuava una elaborazione dei dati per mezzo delle serie di Fourier, che permetteva di localizzare possibili disomogeneità nel muro.

Durante questo esperimento è stato notato che nelle prime ore del mattino, quando i rumori della zona circostante (il traffico, per esempio) erano ridotti al minimo, i segnali di ritorno dal muro potevano essere rilevati da una profondità di mezzo metro.

2 LIMITI DI SICUREZZA

Quando delle onde ultrasoniche colpiscono un materiale, questo subisce delle forze di compressione. Di conseguenza, se l'intensità degli ultrasuoni che vengono indirizzati sul dipinto murale è troppo alta, questo potrebbe esserne danneggiato. E' necessario quindi, determinare la giusta intensità per poter condurre degli esperimenti reversibili. L'intensità del segnale, I , da un trasduttore è data :

$$I = \frac{16h^2 \epsilon^2}{c^2} fr^2 \frac{V^2}{z} \text{ Watt/m}^2 ,$$

e la relazione fra l'intensità del segnale e la pressione dell'onda ultrasonica è data da:

$$I = \frac{p^2}{2\rho c} \text{ Watt/m}^2$$

Da queste equazioni si calcola che un'onda ultrasonica generata da un segnale di 10 Volts, produce una pressione iniziale di $2,2 \times 10^4$ dyne/cm², che è inferiore alla pressione necessaria per rompere il gesso più friabile o il marmo più debole come è risultato in base a recenti sperimentazioni (4).

Questi calcoli ci indicano inoltre che conosciute le vibrazioni e le proprietà del muro, un'onda ultrasonica della frequenza di 100-300 KHz può essere capace di rilevare difetti di 1 cm, partendo dalla superficie fino ad una profondità di 25 cm, con un fattore di sicurezza 10 volte maggiore rispetto ad un possibile danno del dipinto murale.

3 FASI DELL'ESPERIMENTO

Il programma proposto inizierebbe con la costruzione di muri campione, che abbiano delle dimensioni, dei materiali e delle imperfezioni prestabilite. Quindi verrebbero sperimentati e valutati vari metodi di applicazione dei trasduttori ai dipinti murali. Tali metodi includerebbero l'uso

di gomma ai siliconi, soluzioni acquose, e pellicole plasti che unite a fluidi.

Si passerà poi alla generazione e alla registrazione di ultrasuoni in funzione della frequenza, per riuscire a rilevare la presenza di imperfezioni deliberatamente causate nel muro campione. I segnali registrati saranno quindi trasformati per mezzo dell'analisi delle serie di Fourier da un computer, per determinare quale sia la frequenza e il sistema di applicazione dei trasduttori che conviene adottare per un'esatta rappresentazione delle caratteristiche del muro.

I risultati di tali sperimentazioni potranno quindi di essere verificati con l'esame di un importante affresco che presenti una struttura particolarmente complessa e rilevanti danni da umidità (ad es. gli affreschi della Cappella del Corporale del Duomo di Orvieto).

Per poter condurre le sperimentazioni qui proposte, si renderà necessario innanzitutto l'uso di un calcolatore elettronico per effettuare sui dati l'analisi delle serie di Fourier.

Un massimo di 10 ore effettive di uso del computer è ritenuto sufficiente per effettuare tutte le analisi necessarie.

Inoltre, occorrerà un registratore a nastro (ci sono diverse possibilità sia in Italia che negli Stati Uniti di reperire questa apparecchiatura) per immagazzinare i segnali di ritorno che verranno quindi passati nel computer in un secondo tempo.

SIMBOLOGIA

$$I = \frac{16 h^2 \epsilon^2}{c^2} \frac{f_r^2 V^2}{Z} \text{ Watt/m}^2$$

I = Intensità del segnale d'uscita del trasduttore (MKS)
Watt/m²

h = Coefficiente di sforzo del trasduttore (costante)
(MKS) Newton/Coulomb

h = definizione:

Sforzo prodotto dal trasduttore

Densità di carica applicata al trasd.

ϵ = Costante dielettrica (MKS) $\frac{\text{farad}}{\text{metro}}$

c = Velocità acustica longitudinale dell'onda
in un materiale (MKS) metro/secondo

fr = Frequenza fondamentale di risonanza del
trasduttore (MKS) Hertz

V = Voltaggio applicato al trasduttore
(MKS) volt

Z = Impedenza acustica caratteristica del materiale
irradiato.

$$Z = \rho_0 (\text{densità}) \times c (\text{velocità}) \quad (\text{MKS}) \quad \text{Kg/m}^2 \text{sec}$$

$$I = P^2 / 2 \rho_0 c$$

I = Intensità del segnale d'uscita del trasduttore
(MKS) Watt/m²

P = Pressione esercitata dall'onda ultrasonica
(MKS) Newton/m²
(CGS) Dyne /cm²

ρ_0 = Densità del materiale irraggiato
(MKS) Kg/m³

c = Velocità acustica longitudinale dell'onda in un
materiale (MKS) m/sec

$$c = \sqrt{Y/\rho_0} \quad \text{dove } Y = \text{modulo di Young}$$

$$\rho_0 = \text{densità del materiale}$$

BIBLIOGRAFIA

1. A.J. PALMER - J.F. ASMUS, A Study of Homogenization and Dispersion of Laser-Induced Stress Waves, "Applied Optics", 9, page 227, January 1970.
2. J. KRAUTKRAMER - H. KRAUTKRAMER, Ultrasonic Testing of Materials, "Springer-Verlag", New York, page 440, 1969.
3. D. ENSMINGER, Ultrasonics: The Low-and-High Intensity Applications, Marcel Dekker, New York, page 342, 1973.
4. J.F. ASMUS - M. SERACINI - M. ZETLER, Surface Morphology of Laser-Cleaned Stone, submitted to "Studied in Conservation" for publication.

13 PROGETTO DI RICERCA SUGLI SCAMBI DI UMIDITA'
TRA MATERIALE CARTACEO AMMASSATO E AMBIENTE

G. Accardo
A. Merlani

0 PREMESSA

Come è noto, nei depositi di archivi e biblioteche occorre impedire al materiale cartaceo ivi ammassato di raggiungere condizioni di umidità, temperatura e contaminazione che determinino l'insorgenza di processi di degradazione a carico della cellulosa. A tal fine ciò che più importa non è tanto una rigorosa stabilizzazione termoigrometrica dell'ambiente, quanto di impedire al materiale di raggiungere le predette condizioni critiche (12).

Non appare perciò conveniente ricorrere senz'altro a impianti di climatizzazione degli ambienti in esame, riservando tale soluzione solo a quei casi in cui la carta raggiunge condizioni di pericolo e vi permane per tempi sufficientemente lunghi. La progettazione di una campagna di misure, tali da permettere la messa in evidenza di simili casi, è appunto lo scopo del presente progetto.

Va notato che la semplice misura delle condizioni ambientali non sarà sufficiente per prendere delle decisioni: infatti la carta, se ammassata in quantità sufficientemente grandi in un certo ambiente, ha un effetto "volano" sulle condizioni igrometriche locali, e ciò per mezzo di successivi assorbimenti e desorbimenti di umidità (5,6).

Ne segue pertanto che sarà necessario studiare proprio le variazioni dell'umidità del materiale ammassato, naturalmente in relazione al regime termoigrometrico dell'ambiente, ma assumendo che questo potrebbe risultare, per le ragioni dette, a un livello da ritenersi non pericoloso, mentre sareb-

be di fatto tale il contenuto d'acqua contemporaneamente raggiunto dalla carta (12, 4).

Esistono ampie informazioni in letteratura sui valori di umidità relativa e di temperatura che caratterizzano un ambiente idoneo al deposito di materiale d'archivio o di biblioteca; tali valori si situano, per l'U.R., in un intervallo tra il 40% e il 65%, e per la temperatura al di sotto dei 18°C (1, 4).

Tuttavia, la cellulosa subisce danni quando il tempo di permanenza fuori dalle predette condizioni accettabili è abbastanza lungo da permettere l'avvio dei processi degradativi (12).

1 TECNICHE DI MISURA

I metodi di routine per la misura dell'umidità della carta sono nella maggioranza da definirsi da laboratorio, nel senso che richiedono il prelievo di un campione, determinati accorgimenti per mantenerlo nelle condizioni di partenza, e naturalmente l'impiego di una strumentazione ad hoc.

Questi metodi non si adattano quindi alla ricerca in progetto, per la quale si richiede che i dati di rilevamento siano rappresentabili come una funzione continua, e non come una serie discreta e troppo spaziata di valori.

In un recente lavoro di V.G. Privalov (12) è stato utilizzato un metodo che sembra rispondere a tale esigenza, e che consiste nella determinazione a distanza del grado di umi-

dità della carta per mezzo di captatori-trasmittitori elettrometrici. La tecnica fa ricorso a dei rettangoli di carta campione, su cui sono fissati due elettrodi piatti. Viene misurata, facendovi passare una debolissima corrente, la conduttività della carta che varia in funzione dell'umidità percentuale contenuta, secondo la formula: $v = aW^b$ (dove v e W sono rispettivamente la conducibilità e l'umidità della carta, mentre a e b sono due parametri da determinare tarando il metodo di misura per mezzo di una delle classiche determinazioni del contenuto di acqua).

Il metodo è piuttosto elastico, e, come è stato usato dall'autore citato, permette misure in un campo di variazioni del contenuto d'acqua della carta corrispondente a variazioni dell'umidità relativa dell'aria dal 29% al 95%. Inoltre, gli elementi sensibili dell'apparato possono essere inseriti in qualunque blocco di carta ed ivi lasciati, evitando quindi ogni perturbazione del sistema su cui si sta lavorando. È importante notare la possibilità che questo metodo offra di registrare con assoluta continuità i risultati. Privalov ha effettuato letture settimanali, ma nulla vieta di pensare ad un collegamento con apparecchi registratori a bassa velocità della carta che consentano un rilevamento continuativo.

Un'altra metodologia di misura, simile a quella descritta, sfrutta invece la relazione esistente tra la costante dielettrica del materiale e il suo contenuto d'acqua. In questo caso, invece di misurare la conduttività si misura la capacità elettrostatica, che, dipendendo dal valore della costante dielettrica, è quindi funzione del contenuto d'acqua

del campione. Per tali misure si sono usate correnti ad alta frequenza con buon successo (8, 10).

In alternativa al precedente esiste ancora un altro metodo che impiega una radio-frequenza a bassa potenza. Il principio di funzionamento è basato sulla relazione esistente tra l'attenuazione della radio-frequenza inviata nel materiale, e lo spessore e il contenuto d'umidità dello stesso. Naturalmente questa tecnica di misura richiede una taratura preventiva, dato che la trasmissione delle onde elettromagnetiche dipende anche dalla qualità del materiale e dalla sua compattezza. Tuttavia, poichè nel campo delle frequenze radio la curva di assorbimento dell'energia in funzione della lunghezza d'onda inviata attraverso un materiale umido è diversa a seconda della composizione dell'acqua (H₂O distillata, dolce o di mare), mentre nel campo delle microonde le tre curve sono uguali, per il tipo di applicazione richiesto dal presente progetto la scelta dovrebbe cadere su quest'ultima banda di frequenza (7). In tal modo si semplificherebbe molto la taratura e la calibrazione del sistema di misura, dipendendo l'attenuazione del segnale dalla quantità d'acqua e non dalla sua composizione chimica.

2 FASI DELLA RICERCA

Sulla base di quanto si è esposto circa le tecniche a disposizione, si ritiene di dover scegliere il metodo di misure elettrico di V.F. Privalov perchè offre il notevole vantaggio di essere stato sperimentato con successo per

scopi simili a quelli nostri; è applicabile in modo semplice e immediato; richiede una strumentazione i cui costi di acquisto e di esercizio sono sufficientemente bassi.

La verifica a cui il metodo dovrà essere sottoposto si articolerà nelle seguenti fasi:

- a) esecuzione di una serie di misure in camera climatica per la scelta dei campioni di carta da usare nella messa a punto dei sensori elettrometrici;
- b) controllo dei margini di tolleranza relativi alla possibilità di attacco microbiologico;
- c) misure del contenuto e degli scambi di umidità di materiale cartaceo ammassato nei depositi di un archivio o biblioteca della regione.

2 1

Nella prima fase ci si propone di eseguire delle misure su campioni di carta, scelti in modo opportuno e sufficientemente rappresentativo, per analizzare il comportamento e la risposta della carta in funzione delle diverse condizioni termoigrometriche, della qualità del materiale e della sua diversa compattezza. In particolare, è utile misurare il grado di permeabilità della carta in relazione allo spessore ed alla qualità (9).

Le misure predette sono necessarie per la messa a punto di tutta la strumentazione; questa infatti richiede una taratura preliminare. In questa stessa fase inoltre deve essere

realizzata e sperimentata la parte della strumentazione riguardante la registrazione automatica dei dati.

2 2

Nella seconda fase ci si propone di stabilire i tempi di permanenza del materiale cartaceo ammassato ai diversi contenuti di umidità, per i quali si può considerare il materiale stesso in condizioni di sicurezza rispetto all'attacco microbiologico. Si controllerà cioè la velocità di crescita dei microrganismi (funghi e batteri) in rapporto a diversi valori del contenuto di umidità di un certo numero di campioni di carta. Si vuole inoltre sottoporre a verifica il fenomeno biologico, riproducendo in laboratorio le condizioni termoigrometriche degli ambienti in cui saranno collocati i sensori elettrometrici.

2 3

La terza fase del lavoro consisterà nel rilevamento preventivo delle caratteristiche termoigrometriche degli ambienti di un archivio o biblioteca della regione. Ciò al fine di individuare il tipo di microclima prevalente e le eventuali variazioni da luogo a luogo. Inoltre, verranno effettuate nei suddetti ambienti misure di umidità superficiale dei muri e delle suppellettili, al fine di distinguere quei locali nei quali si ha condensazione da quelli in cui l'umidità è presente per infiltrazioni o capillarità. Si dovrà quindi decidere la dislocazione dei vari punti di misura all'interno del materiale cartaceo ammassato. Bisognerà poi distinguere tra le varie

modalità di immagazzinamento della carta: si avranno infatti raccoglitori di vario tipo, risme, libri, scatole chiuse, ecc.; posti sia in scaffali, sia in armadi a tenuta più o meno stagna, di legno o metallo. Ogni caso possibile, e che sarà rilevato praticamente, sarà oggetto di misure.

Contemporaneamente, si dovranno registrare le condizioni termoigrometriche esterne all'edificio; inoltre, ove possibile, tali dati verranno registrati anche all'interno di casaforti e armadi.

Per un'informazione veramente completa su tutte le possibili condizioni in cui può trovarsi il materiale, è da prevedere che la registrazione delle misure debba protrarsi per almeno un anno con sufficiente continuità. Riguardo al numero minimo dei punti di misura, si può dire che esso sarà dato dal numero dei locali, moltiplicato per i modi di immagazzinamento della carta.

Per quanto riguarda la scelta della biblioteca o archivio in cui effettuare l'esperimento, sarà da preferirsi un edificio che presenti le seguenti caratteristiche:

- distribuzione delle raccolte in locali esposti a Nord e a Sud;
- presenza di un locale di deposito interrato, o comunque di elevata inerzia termoigrometrica;
- maggiore varietà possibile di condizioni d'immagazzinamento.

Tra le raccolte da prendersi in considerazione si segnalano: la Biblioteca Comunale di Assisi; la Biblioteca di S.

Basilio di Perugia, la Biblioteca Comunale di Spoleto;
l'Archivio Storico Comunale di Umbertide.

BIBLIOGRAFIA

- 1) F. GALLO - Boll. Istit. Pat. Libro XVI, 3-4, p. 114-199
Roma, 1957
- 2) F. GALLO - ibid, XX, 1-2, p. 36,60, Roma, 1961
- 3) F. GALLO - ibid, XXIII, 1-2, p. 1-18, Roma, 1964
- 4) F. GALLO - P. GALLO - ibid, XXVI, 3-4, p. 143-190, Roma,
1967
- 5) K. TOISCHI - Stud. in Cons., 4, p. 81-87, London, 1959
- 6) G. THOMSON - ibid, 9, p. 153-169, London, 1964
- 7) A. WATSON - Humidity and Moisture a cura di A. Wexler,
vol. 4, p. 87-94, Reinhold Pub. Co., New York, 1965
- 8) R.P. LEROY - ibid, p. 135-140
- 9) F.A. JOY and A.G. WILSON - ibid, p. 259-270
- 10) F.J. HUGHES, J.L. VAALA and R.B. KOCH - ibid, p. 95-98
- 11) W.M. BOUSTEAD - London Conference on Museum Climatology
p. 103-238, London, 1967
- 12) V.F. PRIVALOV - Archives et Bibliotheque de Belgique, n.
speciale 12, p. 255-266, Bruxelles, 1974

Finito di stampare
nel maggio 1976
TECNECO S.p.A.
Via L. Caro, 63
R O M A

