

# La sorveglianza e la manutenzione delle opere d'arte autostradali Esperienze della Soc. Autostrade

Dott. Ing. G. Camomilla

Parte Prima (\*)

## 1 — Premessa

La rete autostradale in concessione alla Società Autostrade comprende un numero notevole di opere d'arte costruite normalmente (1) nell'arco degli ultimi 25 anni. Si tratta di 1256 ponti e viadotti principali; insieme con cavalcavia ed opere minori (di luce inferiore ai 10 m., esclusi i tombini), questo numero si eleva a 3900. Queste cifre danno naturalmente solo un'idea della vastità di questo patrimonio in quanto nella parola « opera » si intende sia il Viadotto Sarno di 91 campate, lungo 3 chilometri, sia un normale sottovia di 25 m. di luce.

Un dato più significativo può essere la lunghezza complessiva di queste opere « principali » che è di 149 chilometri per ogni carreggiata (2). La più gran parte delle opere d'arte della rete (escludendo i cavalcavia) è realizzata in cemento armato (ordinario o precompresso) e le strutture hanno normalmente pochi anni di vita anagrafica; in termini di passaggi sopportati però molte possono considerarsi delle mature signore o addirittura delle vecchiette più o meno arzille. Ci sono naturalmente anche dei casi di decrepitezza.

Infatti si è constatato, al di là della metafora, che dove il calcestruzzo è stato usato in strutture robuste (o addirittura in getti massicci non armati o debolmente armati) non si sono avuti a distanza di 25 e più anni dalla costruzione grossi problemi per la conservazione.

Dove invece, per l'arditezza delle sue concezioni, il cemento armato ha pienamente sfruttato le sue caratteristiche di resistenza, sempre più esaltandole, è invece da considerare che la durabilità delle opere nel tempo potrà essere raggiunta solo affrontando i vari aspetti di tale problema nella loro reale ampiezza.

Questo concetto di « durabilità » ha assunto ai giorni nostri un'importanza elevatissima, in quanto il calcestruzzo non può considerarsi un « materiale eterno » specialmente se ci si riferisce al suo impiego in opere di arte autostradali che, sia per la loro struttura che per le sollecitazioni ripetute e frequenti indotte dal traffico, sono da considerarsi come vere e proprie macchine che, come tali, necessitano di controlli, manutenzione, riparazioni.

(1) Esistono alcune decine di opere costruite prima del 1940, nelle « autostrade » della prima generazione.

(2) Sotto la voce « opere d'arte » sono comprese anche le gallerie, di cui non si tratta in questa sede, che nella rete « Autostrade » sono 278 con uno sviluppo di 120 e 116 chilometri per carreggiata.

(\*) La seconda parte della relazione sarà pubblicata nel n. 3/1984 del Notiziario AICAP.

La peculiarità della società Autostrade rispetto ad altri organismi simili risiede nel fatto che tutte le fasi della vita delle opere ricadono sotto il suo diretto controllo, dalla progettazione, alla costruzione fino all'esercizio con tutti i suoi problemi. Ciò ha permesso di rilevare circa 15 anni fa che i concetti informatori della progettazione non prendevano molto in considerazione proprio l'esercizio delle opere per il quale, tra l'altro, l'opera viene costruita (fig. 1).

A riprova di questo fatto basta vedere in tabella 1 le tipologie prevalenti nelle opere dei diversi « periodi » di costruzione.

Quando venne dato inizio al programma autostradale nel dopoguerra, la rete autostradale italiana comprendeva soltanto la Napoli-Pompei, la Milano-Serra-

Tab. 1

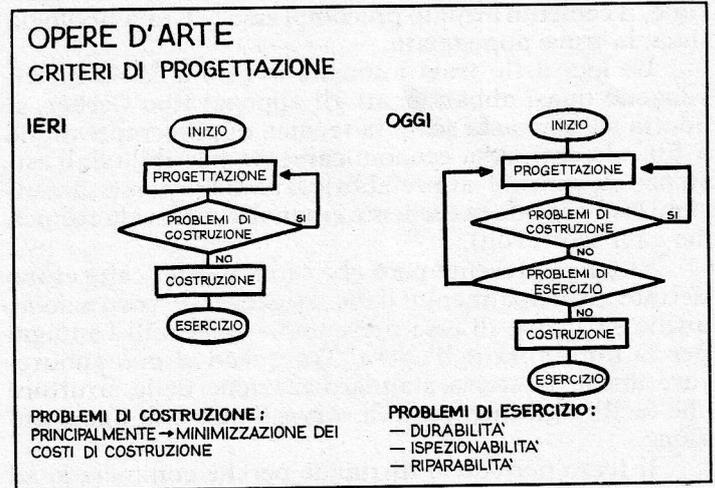


Fig. 1

	MATERIALI	TIPOLOGIE	
		STRUTTURE ISOSTATICHE	STRUTTURE IPERSTATICHE
<b>1° PERIODO (ANNI '50)</b>	C.A.O. C.A.P. (CAVI POST TESI) ACCIAIO-CLS	TRAVI APPOGGIATE (APPOGGI TIPO GERBER) LUCI < 30 METRI	ARCHI TELAIO
<b>2° PERIODO (ANNI '60)</b>	C.A.P. (FILII ADERENTI E CAVI POST TESI)	TRAVI APPOGGIATE LUCI 35÷45 METRI	
<b>3° PERIODO (ANNI '70)</b>	C.A.P. (FILII ADERENTI E CAVI POST TESI)	TRAVI APPOGGIATE LUCI 35÷45 METRI	TRAVI CONTINUE STRUTTURE A SBALZO (TIPO DYWIDAG)

● N.B. - SI TRATTA DI TENDENZE GENERALI CHE HANNO NATURALMENTE IN OGNI PERIODO LA LORO ECCEZIONE.

valle, la Firenze-Mare, la Milano-Torino, la Milano-Venezia e l'autostrada dei Laghi.

Queste autostrade non avevano un rilevante numero di opere d'arte e, su tutte, i manufatti erano costruiti secondo i metodi allora tradizionali: strutture ad arco, travi in cemento armato ordinario.

E' con l'autostrada del Sole, il cui tracciato appenninico comportava rilevanti difficoltà, che nascono le prime grandi opere autostradali per la cui progettazione vennero applicati su vasta scala i nuovi sistemi costruttivi quali il cemento armato precompresso e le strutture miste acciaio-calcestruzzo.

Sull'intera autostrada del Sole, i criteri costruttivi sotto il profilo della progettazione furono i più vari possibili, si può ben considerare perciò quest'autostrada come una palestra nella quale i progettisti posero le basi per tutte le applicazioni pratiche che alla « Sole » dovevano seguire.

Il primo periodo quindi è quello degli inizi, nel quale le tipologie delle opere ed i materiali usati sono i più vari: si usano il cemento armato ordinario, il precompresso, i sistemi misti acciaio-calcestruzzo con travi in profilato o addirittura a struttura reticolare composta di tubi. Le tipologie vanno dai vari tipi di arco e telaio iperstatici, alle strutture isostatiche (travi appoggiate), per le quali è diffusissimo l'uso delle seggiole tipo Gerber.

Il secondo periodo è distinto invece da un orientamento preciso delle scelte progettuali verso soluzioni uniformi, che permettano una *costruzione dell'opera d'arte di tipo industriale*, con una serie di operazioni, le più elementari possibile, ripetute e riunite, come in una catena di montaggio dell'opera d'arte. Quindi questo periodo è caratterizzato dall'uso di un solo tipo di materiale, il cemento armato precompresso e di una tipologia fissa, la trave appoggiata.

Le luci delle travi aumentano fino a 35-45 metri, vengono quasi abbandonati gli appoggi tipo Gerber, si adotta su più vasta scala la tecnica di precompressione a fili aderenti, resa economicamente possibile dall'esistenza di cantieri di prefabbricazione di grosse dimensioni (nel periodo precedente era molto diffusa la tecnica dei cavi scorrevoli).

Si tenga presente però che tutte queste scelte erano dettate principalmente dalle esigenze di costruzione, anche se alcune di esse presentano innegabili vantaggi per la durabilità dell'opera. Tra questi si può annoverare anche la stessa standardizzazione delle strutture che facilita gli interventi di sorveglianza e di manutenzione.

Il terzo periodo si distingue perchè cominciano ad entrare nei motivi di scelta anche considerazioni dettate dalle risultanze dell'esercizio autostradale, ormai diventato « adulto » ed in grado di fornire alcuni elementi da non trascurare nella fase di progettazione.

In questo periodo il cemento armato precompresso rimane il materiale più usato, ma la tipologia subisce alcuni cambiamenti; oltre l'uso di strutture isostatiche che continua, si introduce l'uso più massiccio di travate continue e di strutture a sbalzo tipo dywidag. Queste variazioni sono dettate sì da esigenze costruttive per autostrade di montagna, quali la Brennero o la Trafori, in cui a volte manca lo spazio per creare i cantieri di prefabbricazione del gran numero di travi necessarie, ma anche perchè questo tipo di strutture sono più durevoli nel tempo, necessitano di minori manutenzioni.

Infatti si è visto in questi ultimi 20 anni come le strutture isostatiche, più mobili sottotraffico e con gran numero di giunti di dilatazione, siano più degradabili e

abbiano punti in cui la degradazione è possibile.

Le strutture iperstatiche invece, che forse richiedono un maggior impegno di progettazione e di costruzione, sono più durevoli, purchè naturalmente non siano troppo « leggere ».

Il massimo delle degradazioni infatti si è avuto nella combinazione struttura isostatica-snella e nella struttura iperstatica-snella (ci si riferisce naturalmente ai telai ed agli archi del primo periodo, composti spesso da nervature molto esili).

## 2 — La sorveglianza

Quando si parla di esercizio autostradale e dei problemi che in esso si originano, nasce naturalmente il desiderio di conoscere quali sono i metodi e l'organizzazione che è alla base di questi rilevamenti in autostrada. Tra l'altro questa organizzazione, nota a pochi, è in questo periodo in fase di revisione ed ammodernamento.

Ci aiuteremo con lo schema che segue.

Gli organismi locali sono costituiti dal personale delle 67 sezioni (detti posti di manutenzione) dislocati ogni 30-40 km. di autostrada che giornalmente percorrono il tratto di loro competenza per provvedere a tutte le incombenze che possono presentarsi.

### SORVEGLIANZA DELLE OPERE D'ARTE: METODI ATTUALMENTE IN USO

Tipo di controllo:	Eseguito da:
A - Controlli di routine	organismi locali
B - Controllo annuale	organismi periferici
C - Controlli speciali	organismi centrali, specialistici esterni

### Mezzi impiegati:

- Ispezione visuale
- Saggi distruttivi
- Apparecchiature speciali (saltuariamente, solo per C)

### Archivio dati:

- Schede manuali
- Rappresentazioni grafiche schematiche
- Fotografie.

Gli organismi periferici invece sono dislocati nelle Direzioni di Tronco (8 con circa 300 km. di competenza) e sono costituite dagli Uffici Tecnici Speciali della Soc. SPEA che curano le ispezioni « ravvicinate » con l'uso di ponteggi mobili. Il risultato di questo tipo di sorveglianza (che in genere ha cadenza annuale) viene riportato sulle « schede » dell'opera con dei giudizi circa i difetti e le anomalie riscontrate ed eventuali richieste di ispezioni più approfondite e/o di interventi manutentivi o di riparazione. Naturalmente il ripetersi negli anni di questo tipo di valutazione ha messo in evidenza, da un lato il « comportamento » nel tempo delle diverse tipologie di opera, e dall'altro anche la inadeguatezza di questi sistemi di sorveglianza di tipo « artigianale » basati sulla figura e l'occhio dell'esperto rilevatore, che può « soccombere » di fronte al numero delle opere da esaminare ed alla necessità di trarre regole più generali dai risultati delle singole ispezioni.

Per questi motivi è in corso una revisione dei metodi di sorveglianza secondo lo schema che segue:

## SORVEGLIANZA DELLE OPERE D'ARTE: SVILUPPI PROGRAMMATI

— Uniformare i criteri di valutazione dei difetti	— Preparazione di manuali con la codifica dei difetti (simboli e cause).
— Memorizzare i dati rilevati nelle ispezioni	— Codificazione del metodo di rilevamento in modo da trasferirne gli elementi in una banca dati elettronica.
— Preparare con banca dati di tipo operativo	— Costituzione: — Dati storici tecnico-economici — Dati separati per le diverse « parti » dell'opera (impalcati, pile, spalle, fondazioni, accessori) — Possibilità di previsione di manifestazione dei difetti tipici per opere simili (scenari).
— Produrre sistemi di controllo strumentale « globali »	— « Isolare » alcuni parametri fisici delle opere o a cadenze prefissate con strumenti automatici.
— Perfezionare e specializzare i controlli di tipo non distruttivo	— Messa a punto di sistemi in grado di rilevare e quantizzare i difetti non visibili delle opere in fase di controllo speciale.

Si tratta quindi, per i primi tre scopi descritti nello schema, di rendere disponibile alla elaborazione l'esperienza di tanti anni di lavoro in modo da uniformare i criteri e aumentarne l'efficacia. Il lavoro da fare è solo una paziente e logica schematizzazione di concetti e fenomeni ormai molto conosciuti.

Diversa è invece la situazione per gli altri due scopi, per i quali si è ancora in una fase di ricerca.

Nel campo del controllo globale sembra molto promettente il metodo delle frequenze proprie rilevate in punti specifici dell'opera.

Le esperienze già fatte mostrano come lo spettro di frequenze rilevabile sia una costante della struttura e/o del punto di rilevamento nel suo ambito. La vibrazione può essere fornita dallo stesso traffico autostradale in quanto si è rilevato che è sufficiente mantenere il rilevamento per un numero di passaggi contenuto (almeno su strada con forte traffico merci) per ottenere uno spettro che non varia più in termini di grandezza delle accelerazioni, per ogni frequenza rilevata (ordinata della figura 2).

Il metodo si basa allora sul confronto, in epoche successive, degli spettri così ottenuti, in quanto una variazione delle frequenze tipiche può avvenire:

- per variazioni del sistema di vincolo dell'opera
- per variazioni del prodotto EJ (modulo elastico, momento d'inerzia) e quindi per la successiva degradazione dei materiali o per la formazione di soluzioni di continuità nel corpo della struttura.

Gli studi da intraprendere riguardano la definizione delle frequenze principali da mantenere sotto controllo, visto che il campo rilevato è molto vasto. Si tratta naturalmente della fascia che va da 0 a 500 Hz in quanto il resto sembra scarsamente significativo (è spesso dovuto al

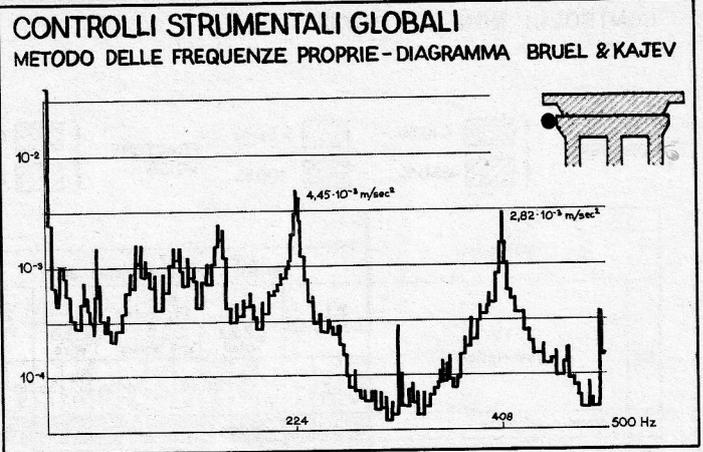


Fig. 2

supporto dello strumento di misura). Si pensa di operare con il calcolo dinamico teorico dei diversi tipi o parti di struttura e con rilevamenti incrociati di opere.

Altri metodi di controllo globale, più tradizionali, consistono nel valutare periodicamente la « posizione » di alcuni punti delle opere rispetto a riferimenti fissi del terreno.

Il disporre di sistemi quantificabili con delle misure migliorerebbe molto la possibilità di prevenzione delle degradazioni più gravi, permettendo tempestivamente un controllo più accurato e specialistico dell'opera ed il successivo intervento risanatore. Per quest'ultimo tipo di controllo i sistemi più promettenti sono quelli che vanno sotto il nome di metodi non distruttivi.

Malgrado i continui miglioramenti in questo settore è ancora impossibile pensare di poter già usare questi metodi per la sorveglianza sistematica, in quanto occorrerebbe più tempo, uomini e denaro di quello che è possibile avere; più logico è pensare ad un loro impiego per il controllo accurato di opere in condizioni precarie o sospette. La caratteristica principale dei metodi non distruttivi è infatti, al momento attuale, quella che più di uno di essi deve essere usato contemporaneamente sulla stessa anomalia, per ottenere una valutazione più precisa e accurata.

Per questi metodi inoltre è ancora essenziale la sensibilità e la preparazione dell'operatore, siamo quindi ancora in quella che ho definito fase « artigianale » dell'approccio al problema, dando a questa parola tutto il suo nobile contenuto, ma riconoscendo purtroppo il lungo cammino da percorrere per raggiungere l'operatività « industriale del metodo ».

Riportiamo nella tabella 2 i risultati degli studi su diversi metodi di controllo di questo tipo fatti dalla Federal Highway Administration statunitense allo scopo di fornire delle chiavi interpretative di uso pratico: si può notare come per ogni condizione e per ogni tipo di difetto sia consigliato un sistema diverso. E' quindi dal loro impiego incrociato che si sviluppa una sinergia elevata del controllo.

Anche in Italia lavori di questo tipo sono stati condotti con successo per esempio nella valutazione delle fessurazioni e della misura della trazione di precompressione esistente nelle travi dei ponti danneggiati dal sisma del Friuli sull'autostrada Udine-Carnia. In questo caso le misure di flusso magnetico sono state incrociate con quelle di resistività elettrica e con ultrasuoni.

**CONTROLLI NON DISTRUTTIVI**

- 1-NON-QUANTITATIVO
- 2-NON RIVELABILE DOPO EVENTO
- 3-BISOGNA PENETRARE CEMENTO (E CONDOTTO)
- 4-NON APPLICABILI A PONTI ESISTENTI
- 5-FATTIBILITA' NON STABILITA
- 6-SENSIBILE PRINCIPALMENTE A VUOTTI
- 7-RICHIEDE ACCESSO A TUTTI E DUE I LATI

**CORROSION** { < 10%    > 50%  
 < 50%    100%

**FRACTURE VOIDS** { OTTIMO    MEDIOCRE  
 BUONO    INADEGUATO

1.0 Methods		2.0 Sensitivity														3.0 Accomodate field environment	4.0 Access inspection area	5.0 Potential for development	
No.	1.2 Description	2.1 No duct or non-metallic duct							2.2 Metallic duct										
		2.1.1 Corrosion			2.1.2 Fracture			2.1.3 Voids	2.2.1 Corrosion			2.2.2 Fracture			2.2.3 Voids				
		2.2.2.1 Total	2.2.2.2 2-4 Wires	2.2.2.3 1 Wire	2.2.2.1 Total	2.2.2.2 2-4 Wires	2.2.2.3 1 Wire	2.2.2.1 Total	2.2.2.2 2-4 Wires	2.2.2.3 1 Wire									
1	Acoustic emission																		
2	Eddy current																		
3	Electrical resistance (concrete)																		
4	Electrical resistance (steel)																	3	
5	Electromagnetic non-linear																		5
6	Electromagnetic reflection																		
7	Electromagnetic reflectometry																	3	
8	Half-cell potential																		
9	Holography																		
10	Magnetic field																		
11	Mossbauer																		
12	Radiography																	7	
13	Strain gauge (vibration)																		4
14	Thermal																		
15	Ultrasonics (scattering)																	7	5

Nella tabella sono mostrati i risultati di una ricerca del FHA su 15 metodi non distruttivi esaminati da diversi organismi di ricerca statunitensi. I risultati si riferiscono a 72 documenti prodotti sull'argomento.

I metodi sono:

- Emissione acustica
- Correnti di Foucault
- Resistenza elettrica (del cemento)
- Resistenza elettrica (dell'acciaio)
- Elettromagnetismo (non lineare)
- Elettromagnetismo (a riflessione)
- Elettromagnetismo (a riflettometria «Time domain»)
- Potenziale semicella
- Olografia
- Misure di campo magnetico
- Mossbauer
- Radiografia
- Estensimetrico (a vibrazioni)
- Termico
- Dispersione a ultrasuoni

La potenzialità e la validità dei metodi esaminati è riportata in tabella 2 con i seguenti significati.

- 1.0 **Metodi:** autoesplicativo
- 1.1 **No:** autoesplicativo

- 1.2 **Descrizione:** autoesplicativo
- 2.0 **Sensibilità:** Efficacia del metodo per rivelare le condizioni del ferro d'armatura in cemento precompresso.
- 2.1 **Senza condotto o con condotto non-metallico:** Configurazione pre-tensionata senza condotto o guaina attorno al ferro d'armatura, oppure una configurazione post-tensionata con un condotto non-metallico.
- 2.1.1 **Corrosione:** Rivelazione della perdita di sezione dovuta alla corrosione. La sensibilità allo spessore della copertura di cemento delle varie categorie serve ad indicare l'effetto della copertura sulla rivelazione dei difetti.
- 2.1.2 **Frattura:** Frattura di un tondino o di un cavo d'armatura. La frattura può essere il risultato di un sovraccarico in conseguenza alla riduzione di sezione dovuto alla corrosione oppure il risultato di danno meccanico dovuto ad impatti veicolari.
- 2.1.2.1 **Totale:** Rivelazione della frattura totale di un cavo, tondino o barra.
- 2.1.2.2 **2-4 Fili:** Rivelazione della frattura da 2 a 4 fili di un cavo.
- 2.1.2.3 **1 Filo:** Rivelazione della frattura di 1 solo filo di un cavo.
- 2.1.3 **Vuoti:** Rivelazione di vuoti di  $\phi$  3 mm o più, già presente al momento della fabbricazione di una barra.

- 2.2 **Condotto metallico:** Vedi n. 2.1, ma in questo caso il tondino, barra o cavo risulta incorporato dentro un condotto metallico (normalmente d'acciaio). Generalmente la valutazione corrisponde alla configurazione post-tensionata.
- 2.2.1 Vedi 2.1.1.
- 2.2.2 Vedi 2.1.2.
- 2.2.2.1 Vedi 2.1.2.1.
- 2.2.2.2 Vedi 2.1.2.2.
- 2.2.2.3 Vedi 2.1.2.3.
- 3.0 **Adattabilità all'ambiente ed al luogo:** La valutazione rappresenta la adattabilità del metodo a funzionare nelle condizioni incontrate sul campo.
- 4.0 **Accesso zone d'ispezione:** La valutazione rappresenta la facilità con la quale l'attrezzatura necessaria per ciascun metodo (in termini di grandezza, conformazione o peso) può essere installata e spostata ai punti d'ispezione sui ponti. Viene indicato in nota (7) se il metodo richiede l'accessibilità dei lati opposti della trave, oppure la penetrazione del cemento (o del condotto) (3).
- 5.0 **Potenziale di sviluppo (entro i termini del contratto):** La valutazione rappresenta la probabilità che il metodo può essere sviluppato entro i limiti tecnici ed economici degli attuali contratti di ricerca.

3 — La degradazione

Proseguendo nel nostro forzatamente rapido esame delle esperienze fatte sulle opere autostradali, è necessario accennare alle cause di degradazione più ricorrenti che si sono rilevate in questi ultimi 25 anni con le operazioni di sorveglianza di cui si è parlato.

Vogliamo prescindere da quelle cause che derivano da errori gravi nella progettazione o nella esecuzione delle opere sia perchè queste costituiscono degli aspetti molto particolari del problema sia perchè, e questo è un dato molto confortante, sono veramente poco diffuse.

Parleremo invece delle altre cause, meno prevedibili e conosciute fino a pochi anni fa, ma che in termini economici sono le più gravose in assoluto e, questo è un particolare sconcertante e confortante al tempo stesso, avrebbero potuto e potrebbero essere evitate o almeno contenute, con una ridotta spesa iniziale.

A questo proposito è interessante notare come le maggiori o minori probabilità di degradazione di un'opera siano legate ad un maggiore o minore sovradimensionamento iniziale. Infatti se si esaminano l'entità dei carichi di progetto, la loro distribuzione trasversale, il diverso grado di contemporaneità di presenza sull'opera e i diversi coefficienti dinamici prescritti nelle norme di diversi paesi, si possono fare interessanti considerazioni. In uno studio condotto dall'OCSE sulla capacità portante dei ponti si è tentato questo confronto ricorrendo ad una schematizzazione dei carichi di progetto; il risultato è mostrato nel diagramma in figura 3.

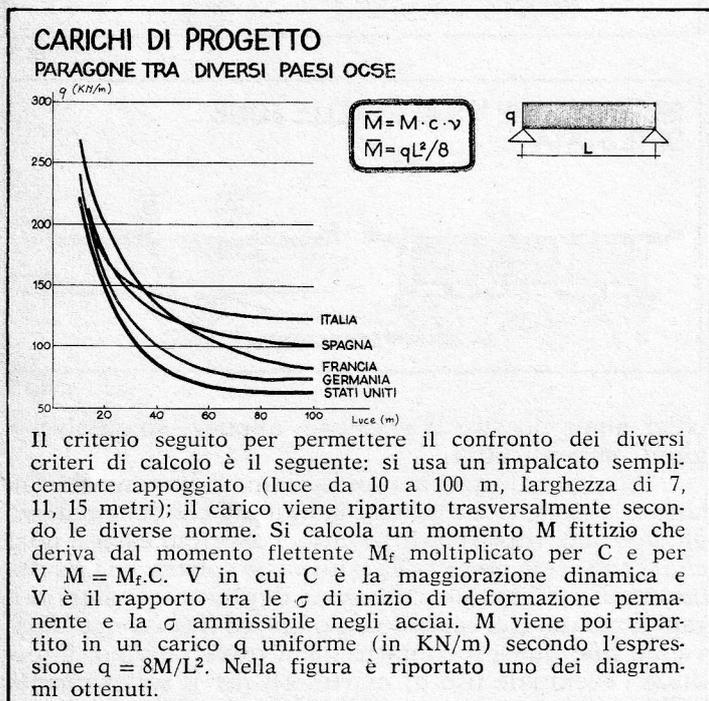


Fig. 3

Si vede come le norme italiane (per i ponti già costruiti) siano abbastanza vincolanti, specialmente per quel che riguarda le opere di luce superiore ai 30-35 m. In paesi come Stati Uniti e Germania invece i carichi di progetto sono molto più contenuti e ciò porta sicuramente alla costruzione di opere « più leggere ». Il motivo può risiedere nella tendenza che questi paesi hanno a considerare limitato nel tempo, in modo prestabilito, il periodo di servizio, la vita utile dell'opera stessa.

Nella figura 4 è riportato il programma di sostitu-

zione dei ponti in un lander tedesco, con una cadenza di 60 anni di uso. Se però per qualche motivo questa sostituzione non è possibile si possono avere seri inconvenienti nell'affidabilità delle opere; recenti valutazioni effettuate negli Stati Uniti, che non hanno potuto eseguire i programmi di sostituzione, mostrano come circa 268 mila opere siano molto degradate e circa 300 mila in condizioni disastrose.

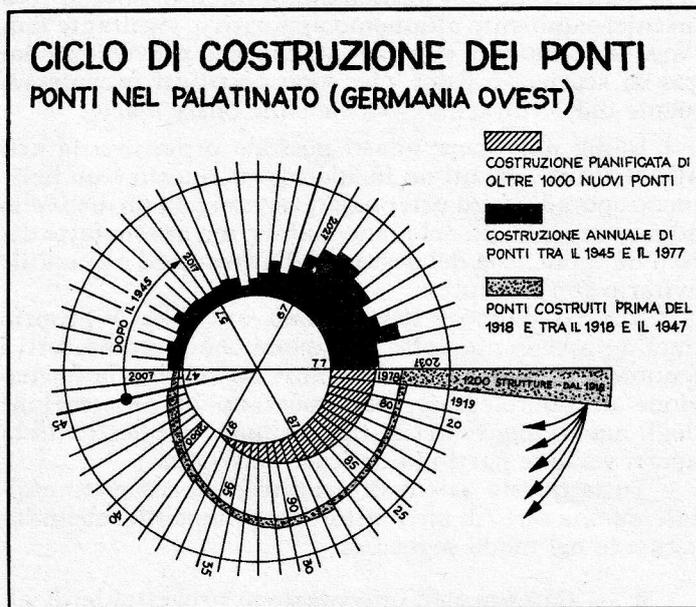


Fig. 4



Tab. 3

Le conclusioni dello studio OCSE sono che un certo sovradimensionamento iniziale di certe parti delle opere, incidendo solo per il 3 ÷ 5% dei costi di costruzione, influisce in modo notevolissimo sulla durabilità dell'opera.

Per fortuna l'Italia, come si è visto, con le sue norme di progettazione per i ponti di 1ª categoria ha seguito nel passato, proprio questa filosofia.

Passiamo ora ad esaminare le cause di degradazioni (vedi tabella 3) che si possono riassumere in due voci:

Azioni atmosferiche  
Azioni dovute al traffico

La prima causa riguarda gli aspetti dell'aggressività dell'ambiente (urbano, industriale marino ecc.) e del clima, ben noti, ed esaltati in autostrada nei periodi invernali per l'uso sistematico dei sali fondenti. La seconda causa è tipicamente autostradale, in quanto propria delle strade con traffico molto intenso, dove si crea un microambiente altamente aggressivo, risultante dall'azione combinata degli agenti chimici, provenienti dai gas di scarico, e fisici, che sono costituiti prevalentemente dalle vibrazioni indotte sulle opere d'arte.

Danni alle opere infatti possono provenire da urti alle strutture dovuti ad incidenti, ma questo è un fenomeno sporadico; gli urti possono nascere da un dislivello ad una irregolarità del piano viabile, ma questo fatto deriva da un'incuria del gestore della strada ed è possibile evitarlo con facilità.

Il vero danno « fisico » non evitabile è proprio quello proveniente dalle vibrazioni che esaltano tutti i fenomeni di degradazione; infatti facilitando la formazione di microfessure, incrementano la penetrazione degli agenti aggressivi di tipo chimico in questi varchi aperti verso le parti più delicate dell'opera.

Tutte queste azioni di degradazione vengono esaltate da una serie di altri fattori raggruppabili schematicamente nel modo seguente:

- A — Carenze nell'impostazione progettuale di alcune parti dell'opera
- B — Errori di esecuzione
- C — Mancanza di protezioni e di cura nei particolari costruttivi
- D — Impiego di materiali poco studiati dal punto di vista della durabilità o poco protetti.

3-1 Degradazioni dovute a carenze progettuali

Faremo qualche esempio per meglio chiarire i concetti esposti; cominciamo dalle carenze progettuali in certe parti delle opere, esaminando la figura 5 che rappresenta i modi con cui è stata risolta nelle opere esistenti la struttura della zona di transizione tra due campate contigue.

Le soluzioni in figura sono suddivise con un giudizio di validità, che è basato sul diverso grado di durabilità, ispezionabilità ed economia che le soluzioni hanno dimostrato.

Nel primo gruppo sono inserite le soluzioni che richiedono un solo giunto di dilatazione e permettono l'ispezione delle zone d'appoggio; esse sono anche caratterizzate da ridotta mobilità sotto traffico e quindi risultano più durevoli.

La validità intermedia discende da problemi di tipo economico (due giunti invece che uno) oppure dalla maggior probabilità di degradazione delle solette del tipo mostrato.

Il terzo gruppo è quello delle soluzioni da scartare ed è purtroppo costituito dai tipi più diffusi nel passato; la presenza di doppi giunti, l'eccessiva mobilità (ci sono giunti su solette con sbalzo superiore al metro) e la non ispezionabilità (i famigerati appoggi Gerber) hanno causato e causano le degradazioni maggiori e le più pericolose. Si può notare come quasi tutte queste soluzioni siano nate per risolvere o facilitare problemi di costruzione. Alcune potrebbero essere conservate nelle progettazioni future, prevedendo però degli accorgimenti spe-

**A CARENZE PROGETTUALI**  
ZONA DI TRANSIZIONE TRA CAMPATE CONTIGUE

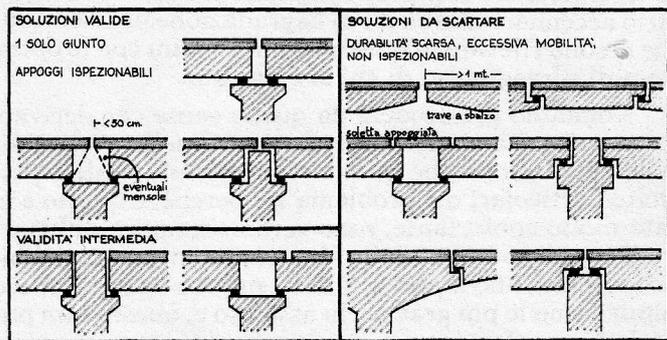


Fig. 5

**A CARENZE PROGETTUALI**  
ZONA DI TESTATA

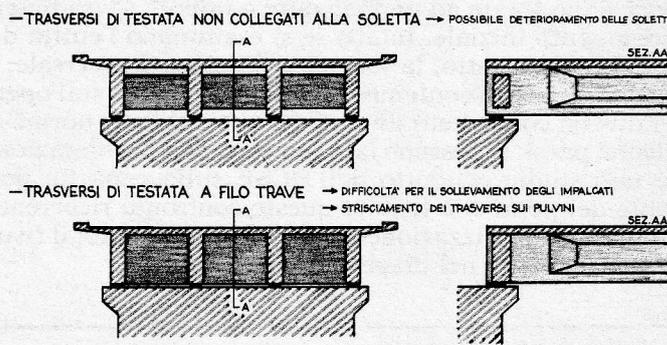


Fig. 6

**SISTEMAZIONE "IDEALE" DELLE ZONE DI TESTATA**

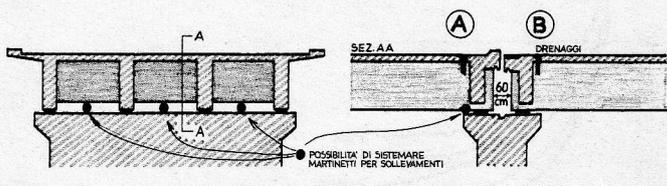


Fig. 7

cifici quali finestre d'ispezione, appoggi smontabili e giunti impermeabili.

Proseguendo questo rapido esame delle zone di transizione possiamo esaminare la figura 6 che schematizza alcuni tipici trasversali di testata. Nel primo caso si nota che il trasverso non è collegato con la soletta, che risulta così molto più mobile della zona di giunto e si deteriora rapidamente. Nel secondo caso invece il trasverso, arrivando fino quasi a contatto della trave pulvino, impedisce l'eventuale uso di martinetti per il sollevamento dell'impalcato ed in caso di schiacciamento degli appoggi, striscia sul travaso danneggiandolo.

Una progettazione alla luce delle esperienze fatte dovrebbe allora prevedere una serie di accorgimenti (illustrati in figura 7) diversi in caso di giunto di superficie o sotto pavimentazione (cioè in funzione della luce delle campate che decide la scelta dell'uno o dell'altro tipo di giunto). A parte la forma del trasverso è importante provvedere all'aumento di rigidità e di armatura della soletta in testata; nel passato quasi sempre lo spessore del calcestruzzo e la sezione dei ferri in questo punto tormentato non era diversa rispetto al resto della soletta. Gocciolatoi e drenaggi completano la sistemazione.

3-2 *Degradazioni dovute ad errori di esecuzione*

I più diffusi errori di esecuzione possono essere riassunti nelle tre voci che seguono:

- 1 — *Errori nell'iniezione delle guaine di precompressione*
- 2 — *Errori nella preparazione e nella messa in opera dei calcestruzzi*
- 3 — *Riduzione od annullamento in fase di esecuzione dello spessore di copriferro*

Per quel che riguarda l'iniezione delle guaine esiste una gamma ben precisa di errori (vedi tabella 4). Il primo è l'aver dimenticato di eseguire l'iniezione, fatto questo che può anche derivare da una carenza progettuale in quanto l'operazione, per esempio, doveva essere fatta in condizioni di ridotta accessibilità; questo errore non è sempre dei più gravi, se la sorveglianza è buona ed il guaio si scopre per tempo, in quanto è relativamente facile riempire una guaina vuota. Più grave è l'errore derivante dall'uso di boiacche non colloidali o dal fatto di non spurgare bene i condotti, facendo fuoriuscire la boiaccia dall'estremità opposta all'iniezione fino a che la sua viscosità non uguaglia quella all'ingresso. In questo caso il cemento può decantare e dar luogo a zone di ferro scoperte non comunicanti tra loro; ciò rende più difficile il riempimento a posteriori.

Il terzo caso riguarda l'impiego di boiacche inconsistenti e non ben dosate, che danno luogo ad un prodotto finale non indurito, spugnoso e fessurato.

In questi ultimi due casi i processi di corrosione sono esaltati dalla presenza di areazione differenziata e dalla facilitazione con cui gli ioni aggressivi possono raggiungere l'acciaio di precompressione, che essendo sotto forte tensione è molto più aggredibile dell'acciaio normale.

Per tutti questi errori esiste a mio parere una causa di fondo comune, che non è di natura strettamente tecnica, ma rientra nel modo con cui è consuetudine compensare questo lavoro; l'iniezione infatti è compresa nel prezzo di fornitura dell'acciaio armonico e spesso nel passato l'operazione complessiva era eseguita da due ditte diverse:

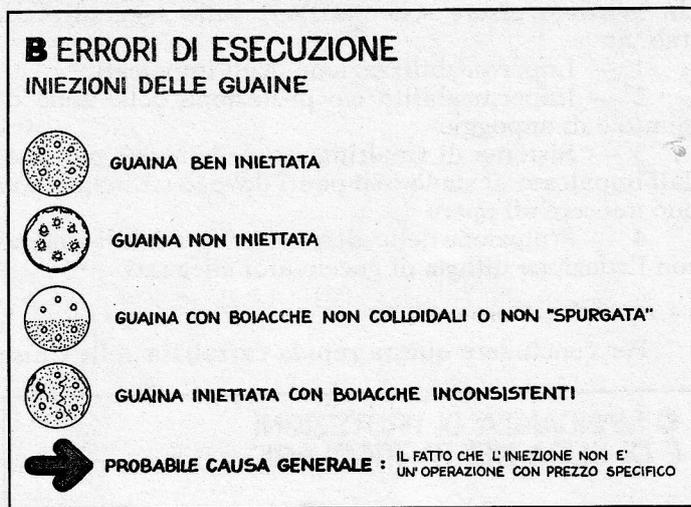
- lo specialista dei cavi, che eseguiva la messa in opera e l'ancoraggio degli acciai
- la ditta appaltatrice dell'opera, che eseguiva le iniezioni.

E' invece necessario distinguere le due operazioni in termini economici prevedendo per la seconda un prezzo specifico, che tenga conto delle cure e dei materiali che servono per compierla « a regola d'arte ».

Questa espressione tra l'altro ha finalmente, anche nel campo delle iniezioni, il suo significato esatto, in quanto oggi si sa come e con che cosa l'iniezione dovrebbe essere fatta.

Passiamo ora al secondo errore più diffuso che è quello che riguarda l'esecuzione dei calcestruzzi; nella maggior parte dei casi si tratta della formazione di vespai localizzati dovuti alla segregazione dei materiali. Solo nelle strutture di « minore importanza » (spalle, paramenti, pile) risultano delle carenze dovute a errori nel rapporto acqua/cemento. Bleeding nei getti delle solette si riscontrano però con una certa frequenza.

Per dare un giudizio articolato in questo settore occorrerebbe però un intero trattato; quello che si può dire in modo succinto è che le resistenze di questo materiale non sono quasi mai carenti; non può dirsi altrettanto per la loro durabilità nel tempo. Tutto ciò proveniva ieri



Tab. 4

anche dalla scarsa conoscenza (e oggi dalla scarsa diffusione della conoscenza) a livello operativo delle tecniche di additivazione e degli accorgimenti applicabili per migliorare queste caratteristiche dei calcestruzzi.

Per concludere questo paragrafo è necessario un accenno ai problemi dei copriferro. La disgregazione di questo strato protettivo è una delle degradazioni più diffuse e più difficili da risanare, sia perchè avviene in zone poco accessibili, sia perchè spesso si interviene quando la corrosione dei ferri è di tipo generalizzato e spinto e riduce l'efficacia dell'intervento. A prescindere dai casi in cui questa degradazione è dovuta ad errori progettuali (insufficienza delle staffe per esempio) occorre dire che spesso la causa è nella scarsa cura con cui sono stati sistemati i distanziatori tra ferro e cassaforma, oppure a segregazioni del calcestruzzo. Lo stato di salute del copriferro che è essenziale per la conservazione delle armature, è anche insidiato dai fenomeni di carbonatazione che possono essere tanto più rapidi quanto più è poroso il materiale interessato. E carbonatazione significa perdita della protezione dovuta all'ambiente alcalino. Per questi motivi prende sempre più piede, come vedremo, la tecnica di protezione tramite verniciatura) anche per i calcestruzzi, questo accenno introduce il paragrafo successivo.

3-3 *Degradazioni dovute a mancanza di protezioni e di cura nei particolari costruttivi*

Questo è un fenomeno sconcertante. I nostri padri hanno raggiunto nel passato vette eccelse nella risoluzione anche architettonica dei problemi di protezione delle strutture dalle acque piovane; basti pensare al cornicione di palazzo Farnese a Roma, opera di Michelangelo, costruito con la funzione umilissima, ma fondamentale nella conservazione dell'opera, dell'allontanamento delle acque di pioggia. Le fantasmagoriche « chimeres » di Notre Dame di Parigi non sono altre che degli efficientissimi pluviali.

Nelle opere d'arte del nostro tempo invece spesso mancano o sono mal realizzati proprio questi dispositivi essenziali per la durabilità.

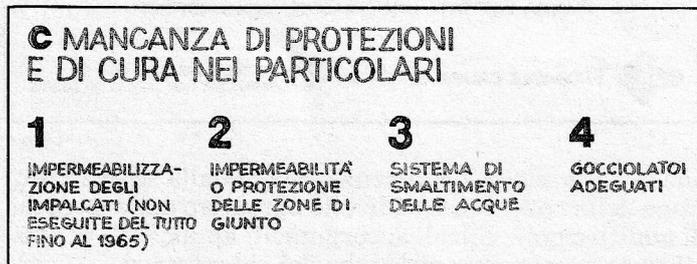
Ho sentito spesso tacciare di pignoleria gli svizzeri, perchè nelle loro norme prevedono una decina di pagine per definire forma, dimensioni, distribuzione dei sistemi di smaltimento della acque; credo però che bisognerebbe imitarli e far aumentare la sensibilità del progettista e del costruttore nei confronti di questi problemi

che possono essere schematizzati nelle seguenti voci (tab. 5):

- 1 — Impermeabilizzazione degli impalcati
- 2 — Impermeabilità e/o protezione delle zone di giunto e di appoggio
- 3 — Sistema di smaltimento delle acque piovane, dall'impalcato al suolo o in punti dove lo stillicidio non può nuocere all'opera
- 4 — Protezione delle altre zone degradabili almeno con l'adozione diffusa di gocciolatoi adeguati.

3-4 *Durabilità dei materiali*

Per concludere questa rapida carrellata sulle cause



Tab. 5



Tab. 6

di degradazione dobbiamo dare un accenno anche alle carenze sulla durabilità intrinseca dei materiali che costituiscono le opere.

Tutti gli accorgimenti che abbiamo descritto nei paragrafi precedenti tendono a proteggere i materiali dalle azioni degradanti, ma qualcosa si può fare per rendere sempre più durevoli per se stessi questi materiali (tab. 6).

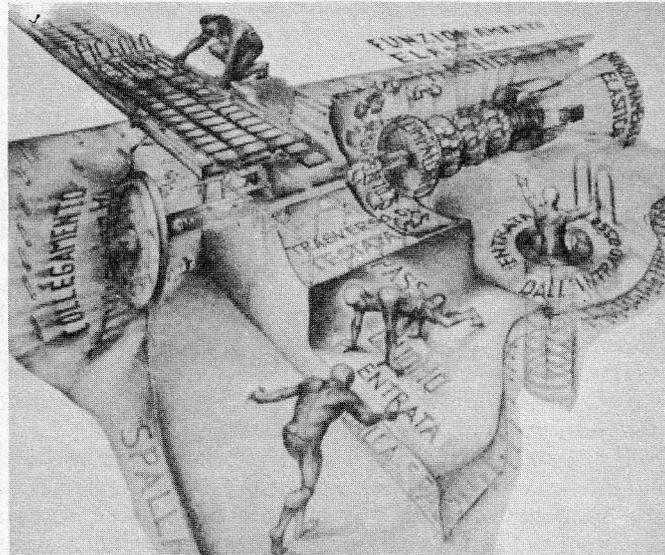
Pur essendo convinto che questa « autoprotezione » spesso non sia sufficiente, sono certo anche che essa migliori notevolmente il comportamento globale dell'opera dal punto di vista della durabilità. Tra l'altro alcuni interventi avrebbero un costo specifico molto contenuto; mi riferisco a quello che si può fare per migliorare la durabilità dei calcestruzzi e delle boiacche da iniezione. Per ottenere questi risultati occorre anche intervenire a livello delle norme tecniche di appalto (cosa già fatta dalla società Autostrade) dove per questi materiali, a fianco delle richieste tradizionali di resistenza, si richiedono garanzie sulle resistenze ed il comportamento nel tempo.

A conclusione di questa parte dell'esposizione vorrei mostrare con un esempio come l'esperienza di cui si è parlato abbia influito sulla progettazione e nella costruzione dell'ultima nota delle autostrade della rete IRI. Mi riferisco alla Carnia-Tarvisio-Confini di Stato, la quale, attraversando una zona alpina con un clima particolarmente aggressivo, aveva una esigenza di durabilità molto spinta (tab. 7).

**AUTOSTRADA CARNIA-TARVISIO**

PONTI CONCEPITI TENENDO CONTO DEI PROBLEMI D'ESERCIZIO

- TRAVI CONTINUE
- STRUTTURA SCATOLARE COIBENTATA
- APPOGGI ACCIAIO-TEFLON
- RITEGNI SISMICI LONGITUDINALI E TRASVERSALI
- SPALLE SCATOLARI
- NUOVI TIPI DI PARAPETTI
- ACCESSIBILITÀ IN OGNI PUNTO SENZA APPARECCHI D'ISPEZIONE
- SOSTITUIBILITÀ DELLE ATTREZZATURE DI VINCOLO
- GRANDI GIUNTI IMPERMEABILI PREFABBRICATI IN ELEMENTI SOSTITUIBILI
- PROTEZIONE DEI CALCESTRUZZI NEI PUNTI PIÙ AGGREDIBILI
- CAPITOLATO CHE TIENE CONTO DELLA DURABILITÀ DEI CLS
- PROVE E CONTROLLI SPECIFICI SULLE BOIACCHE D'INIEZIONE
- IMPERMEABILIZZAZIONI E PAVIMENTAZIONI SPECIALI



L'accessibilità e la protezione antisismica resa graficamente con un disegno dell'arch. E. Mancino

Tab. 7

Nelle opere d'arte di questa autostrada sono in esecuzione i seguenti accorgimenti:

- uso di impalcato a travate continue
- sezione dell'impalcato scatolare a 3 vani (miglior coibentazione della soletta, riduzione della « fatica » degli sbalzi laterali)
- appoggi acciaio-teflon
- ritegni sismici trasversali (pile e spalle) e longitudinali (spalla) a comportamento elastico-plastico
- spalle scatolari
- nuovi tipi di parapetto in calcestruzzo a profilo New Jersey (elevatissima probabilità di rinvio in carreggiata dei veicoli in sbandata, ma peso tale da dover essere previsti in fase di progetto della struttura principale)
- accessibilità in ogni punto dell'opera senza l'impiego di attrezzature speciali d'ispezione
- sostituibilità integrale degli apparecchi di vincolo
- grandi giunti impermeabili, prefabbricati in elementi sostituibili, con movimento possibile comprendente le dilatazioni termiche e l'escursione da sisma.
- norme tecniche d'appalto che prescrivono le caratteristiche di durabilità dei calcestruzzi
- protezione dei calcestruzzi nei punti più « aggredibili »
- prove e controlli specifici sulle boiacche d'iniezione
- impermeabilizzazioni e pavimentazioni speciali per gli impalcati.

# La sorveglianza e la manutenzione delle opere d'arte autostradali Esperienze della Soc. Autostrade

Dott. Ing. G. Camomilla

Parte Seconda (\*)

## 4 — La manutenzione

Vediamo ora sempre rapidamente come deve essere intesa e quali sono i lavori tipici di manutenzione delle opere d'arte. In questo campo molto spesso si fa confusione tra manutenzione e riparazione; ciò accade perchè molti degli interventi si effettuano per l'uno o per l'altro dei motivi. Siccome è importante ai fini amministrativi o per definire certe competenze (specialmente nei regimi di concessione) poter distinguere tra l'uno e l'altro settore, cercheremo di definire meglio la sottile linea di divisione tra manutenzione e riparazione. Un esempio può aiutare più di qualunque discorso: l'opera d'arte che è un congegno complesso, composto di diverse parti, può essere considerata come una « macchina ». Facendo un parallelo allora fra una delle « macchine » più conosciute, l'automobile, e l'opera d'arte si può avere un riferimento più accessibile su ciò che è riparazione e su ciò che è manutenzione.

Lavare, ingrassare un veicolo o fare operazioni di pulizia su di un ponte sono chiaramente manutenzioni. Sostituire le gomme ad un veicolo corrisponde alla sostituzione di un appoggio del ponte: anche questo è manutenzione. Cambiare l'albero motore o sostituire una trave diventa riparazione.

Un caso particolare, che oggi non è inconsueto e che vale per la nostra automobile di paragone e per le opere d'arte, è quello di dotare un'opera di attrezzature che non aveva perchè all'epoca della sua costruzione non erano previste o non esistevano; quindi proteggere i calcestruzzi in certi punti o sostituire i giunti di dilatazione con tipi più recenti e funzionali può rientrare nelle operazioni di manutenzione.

Proseguendo se si vuole negli esempi si giunge quindi alla conclusione che non sempre riparando o sostituendo degli elementi si esce dal campo specifico della manutenzione.

Per concludere allora, uscendo dalle esemplificazioni si può dire che:

- se si interviene su di un'opera ancora « funzionante » si tratta di manutenzione
- se si interviene su di un'opera compromessa nel suo funzionamento, si tratta di riparazione (tab. 8).

Per meglio definire le operazioni di manutenzione possiamo riportare il loro elenco (preso dallo studio OCSE sulla manutenzione dei ponti).



Tab. 8

### Operazioni di manutenzione di routine

A — Pulizia semplice con mezzi meccanici o con operazioni manuali, asportazione di materiali estranei come sporcizia o vegetazioni parassite e attività similari.

B — Sostituzione di elementi deteriorati con sem-

(\*) La prima parte della relazione è stata pubblicata nel n. 2/Febrero 1984 del Notiziario AICAP.

plici operazioni di smontaggio e montaggio.

C — Piccoli risarcimenti, stuccature, riparazioni con malte cementizie o malte sintetiche.

D — Riparazioni localizzate di pavimentazioni e impermeabilizzazioni con materiali bituminosi.

E — Protezione contro la corrosione con verniciature localizzate.

F — Operazioni di lubrificazione e ingrassaggio.

*Operazioni di manutenzione specializzata*

G — Operazioni di restauro di parti strutturali in calcestruzzo (semplice o armato) da eseguire con tecnologie diverse (malte cementizie semplici o speciali, malte sintetiche, chiodature, giunti ecc.) previa protezione delle armature dalla corrosione, se necessario.

H — Operazioni di restauro di strutture in mattoni o pietra da taglio.

I — Protezione di calcestruzzi o di murature dalle azioni disgreganti del gelo, dai sali fondenti e dalle aggressioni atmosferiche con operazioni di verniciatura (film protettivi), d'impregnazione ecc.

L — Iniezioni di fessure in strutture in mattoni o in pietra e in cemento armato semplice o precompresso con boiacche cementizie o resine termoindurenti.

M — Riempimento delle guaine contenenti i cavi di precompressione con boiacche cementizie o resine sintetiche (pure o caricate).

N — Manutenzione delle bullonature o delle saldature di strutture metalliche. Pulizia, ingrassaggio e sostituzioni di parti di usura delle stesse.

O — Protezione contro la corrosione di strutture metalliche con operazioni di sverniciatura e riverniciatura complete su di una parte o sulla totalità delle superfici.

P — Riparazione o ricostruzione dei sistemi di drenaggio (pluviali, tubi di raccolta e di scarico ecc.).

Q — Riparazione o ricostruzione di pavimentazioni ed impermeabilizzazioni degli impalcati.

R — Riparazione o ricostruzione (parziale o totale) di giunti di dilatazione a seconda dei tipi.

S — Manutenzione degli apparecchi d'appoggio con operazioni diverse a seconda dei tipi (riverniciatura e grafitaggio per esempio). Riequilibratura degli stessi anche tramite il sollevamento degli impalcati. Sostituzione degli apparecchi.

T — Operazioni di bonifica delle sistemazioni fluviali o marine a difesa delle fondazioni.

In questa occasione parleremo più specificamente di manutenzione, perché questa attività meglio si presta ad un discorso più generalizzato, di metodologia.

Un altro motivo è che *prevenire (mantenere)* è meglio che *riparare* sia in termini di costi che di tempi tecnici di lavorazione. Si è visto infatti che effettuare operazioni di manutenzione specializzate (come definite in precedenza) su dieci opere costa in termini di tempo e di denaro come intervenire con lavori di riparazione (o sostituzione parziale) su di una sola opera per cui è sufficiente un successo completo nella prevenzione, ogni dieci opere, per avere un pareggio economico delle operazioni.

Per razionalizzare i processi di manutenzione, specialmente per quel che riguarda i lavori più impegnativi, cioè quelli elencati come operazioni specializzate, la nostra esperienza suggerisce la seguente linea d'indirizzo (tab. 9):

1 — Centralizzazione dei dati ottenuti con i controlli sulle opere d'arte almeno per quei controlli di tipo periodico.

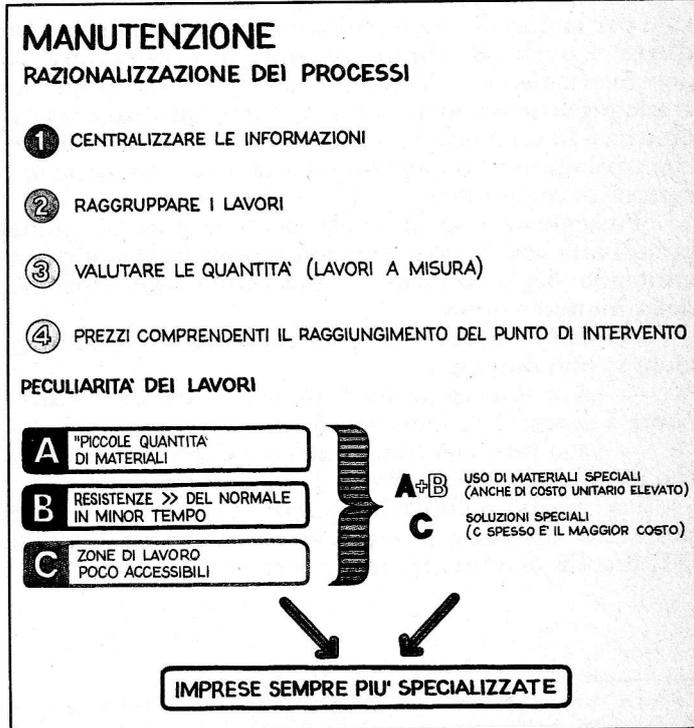
2 — Raggruppamento dei lavori da eseguire anche su opere diverse, compatibilmente con la dilazionabilità dei lavori, con particolare riferimento ai lavori di tipo

TAVOLA SINOTTICA DEGLI INTERVENTI MANUTENTORI

Designazione delle parti delle opere	Manutenzioni di routine	Manutenzioni specializzate periodiche	
<b>a - ATTREZZATURE DELL'OPERA</b>			
1 - Pavimentazioni ed impermeabilizzazioni	D	Q	
2 - Dispositivi di scarico delle acque	A, B	P	
3 - Giunti di dilatazione	A, B, F	R	
4 - Marciapiedi, cordoli	C	G	
5 - Apparecchi d'appoggio	A, F, E	S	
6 - Parapetti e barriere	B, C, E	B	
7 - Dispositivi di illuminazione	A, B	B	
<b>b - STRUTTURE PORTANTI</b>			
1 - Impalcati (solette e travi)	c.a. c.a.p. a	C	GFILP GFILMP NOP
2 - Archi e volte	c.a. m	—	G HIL
3 - Pulvini	c.a. c.a.p.	A	GIL GILM
4 - Pile e spalle	c.a. a	A	GILP NOP
5 - Fondazioni		—	T

c.a. = strutture in cemento armato  
 c.a.p. = strutture in cemento armato precompresso  
 a = strutture in acciaio  
 m = strutture in mattoni o pietra da taglio

Tab. 9



specialistico. Il criterio di raggruppamento si riferisce a lavori simili tra loro o a lavori diversi su ponti posti a breve distanza l'uno dall'altro, in modo da ottenere degli appalti con un ordine di grandezza apprezzabile dalle ditte esecutrici dei lavori stessi. Questo concetto è valido naturalmente solo per i lavori non eseguiti direttamente.

3 — Valutazione, quando possibile, delle quantità da eseguire per ogni tipo di lavoro, in modo da poter affidare i lavori a misura, sempre nell'ipotesi di esecuzione non diretta.

4 — Inserimento in ciascuno dei prezzi formulati per i singoli lavori dell'onere per il raggiungimento del punto o dei punti dove gli interventi devono essere eseguiti (quindi prezzi che tengano conto del tipo di ponteggio — mobile o fisso — da utilizzare di volta in volta).

Questo modo di procedere, oltre a permettere una precisa valutazione a priori dei costi delle manutenzioni, specialmente nel caso di affidamento a imprese specializzate, permette anche una notevole economia globale e stimola la formazione ed il continuo aggiornamento delle imprese stesse, a garanzia di sempre migliori risultati tecnici.

Per comportarsi in questo modo è però stato necessario acquisire una certa esperienza prima nella rilevazione dei difetti come si è detto, poi nel modo di formulare le gare d'appalto, anche per quel che concerne le stime e gli elenchi prezzi, che devono essere preparati in modo specifico per questi interventi.

La peculiarità dei lavori di manutenzione rispetto a quelli di costruzione infatti sono molteplici:

- in genere vengono messe in opera « piccole » quantità di materiali (solo ripristini o interventi parziali)
- questi materiali devono assumere delle resistenze di funzionamento in genere più elevate dei normali materiali da costruzione, ed in un tempo minore (esigenze del traffico per esempio)
- le zone in cui si deve intervenire sono poco accessibili; il cantiere deve svilupparsi su piccoli spazi
- c'è un costo aggiuntivo per la sorveglianza e la sicurezza del traffico.

Queste peculiarità spingono all'uso di materiali speciali che possono avere anche un costo unitario molto elevato se assicurano l'affidabilità e la rapidità dell'intervento. Inoltre spesso, visto che l'accessibilità al punto di lavoro potrebbe avere un costo molte volte superiore a quello dell'intervento stesso, anche per questo problema si ricorre a mezzi speciali (passerelle e ponteggi mobili, operanti dall'impalcato, analoghi a quelli usati per la sorveglianza).

La conseguenza ultima è che questo genere di lavori deve essere eseguito da imprese specializzate sia nell'uso dei materiali che nella dotazione di attrezzature. L'aumento costante negli ultimi anni di questo tipo di imprese, che è stato auspicato e favorito dalla società Autostrade prima che da altri enti, dimostra che questa è veramente la via da seguire per la razionalizzazione di questi lavori.

## 5 — Tecniche speciali di manutenzione

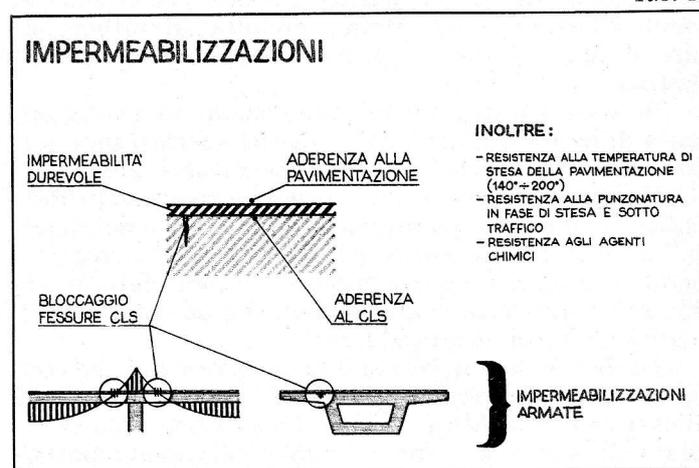
Vediamo ora con maggior dettaglio qualche operazione di manutenzione in cui vengano richieste tecniche specializzate; non possiamo in questa sede fare un

esame completo. Ci soffermeremo soltanto su quelle che vengono impiegate più frequentemente o su quelle che presentano qualche novità od originalità rispetto i lavori di tipo tradizionale usati nella costruzione delle opere d'arte. Anche l'estensione delle singole parti è stata guidata da criteri analoghi.

### 5-1 Impermeabilizzazione degli impalcati

Lo scopo essenziale di queste opere è di impedire che le acque meteoriche, attraverso la pavimentazione, penetrino nel calcestruzzo provocandone una progressiva degradazione ed attacchino i ferri di armatura. Vediamo in generale quali devono essere le caratteristiche da conferire a questo tipo di protezione (tab. 10).

Tab. 10



Occorre in primo luogo che l'impermeabilizzazione sia aderente ai calcestruzzi delle solette<sup>(3)</sup> e sia in grado di assorbire senza rompersi, lesioni del supporto successive alla messa in opera dello strato impermeabilizzante, dell'ordine di grandezza del millimetro.

E' opportuno inoltre che un eventuale passaggio di acqua per successive lesioni nell'impermeabilizzazione non comprometta l'aderenza delle zone limitrofe ma rimanga circoscritto senza diffondersi su larghe fasce di impalcato. Altra caratteristica richiesta è l'aderenza dell'impermeabilizzazione alla pavimentazione sovrastante onde evitare rifluimenti del manto stradale generati dalle azioni tangenziali indotte dal traffico (in curva o in frenata).

Altri requisiti sono:

- Impermeabilità;
- Resistenza agli agenti chimici aggressivi;
- Resistenza alle temperature di stesa delle pavimentazioni (da 140° a 200° C);
- Resistenza alle azioni di punzonatura e tangenziali indotte dal traffico di cantiere e dal traffico autostradale.

I tipi di impermeabilizzazione finora adottati sono:

- trattamenti a base di eposi-catrame;
- cappe di mastice d'asfalto sintetico;
- guaine preformate a base di prodotti bituminosi ed elastomeri, armati con fibre sintetiche.

<sup>(3)</sup> A volte questi calcestruzzi vengono trattati prima dell'impermeabilizzazione.

Sono state fatte inoltre sporadiche applicazioni sperimentali con altri prodotti quali peci di catrame, malte asfaltiche, resine epossidiche pure, resine eposi-catramose e resine poliesteri armate che riteniamo da non prendersi in considerazione perchè decisamente inidonee o eccessivamente onerose.

Le considerazioni sulla validità delle tecniche più diffusamente adottate derivano dalle esperienze ricavate sulle tratte autostradali con maggior traffico, unico elemento di convalida definitiva.

#### *Trattamenti a base di eposi-catrame*

Il loro impiego è iniziato nel 1967 e ne sono state poste in opera oltre 500.000 m<sup>2</sup> (sulla sola rete IRI). Si sono verificati, in alcuni casi, inconvenienti con distruzione dello strato impermeabile sotto le fasce di pavimentazione battute dal traffico pesante che riteniamo dovute all'azione di « pumping » indotta dal traffico, oppure ad applicazioni eseguite in condizioni ambientali avverse.

Si sono rilevate anche infiltrazioni in corrispondenza di lesioni capillari delle solette, apertesi successivamente alla posa dello strato impermeabilizzante.

Per queste impermeabilizzazioni è risultato problematico il controllo qualitativo e quantitativo dei materiali a causa dell'impossibilità di effettuare sistematicamente le complicate prove previste nei capitolati e per le obiettive difficoltà che si incontrano ad accertare la qualità ed il tipo degli indurenti.

Per inciso, la notevole spinta concorrenziale ha contribuito a dequalificare il prodotto finito, in carenza di efficaci controlli. Altra ragione d'insuccesso è da ricercarsi nell'esiguo spessore (1,5 mm) conferito ai manti di eposi-catrame, dovuto alla necessità di contenere il costo del trattamento.

Per queste ragioni l'impiego di questa tecnica è stato praticamente sospeso e non si vede al momento l'opportunità di riprenderlo in quanto l'impiego di spessori più elevati di resine comporterebbe costi non competitivi con altri trattamenti messi a punto negli ultimi anni e che hanno dato buoni risultati.

#### *Cappe di mastice d'asfalto sintetico*

Le prime applicazioni si riferiscono al tratto Rivaloro-Rapallo dell'autostrada Genova-Sestri nel 1968, estese successivamente alle altre autostrade in costruzione come alternativa alle applicazioni eposi-catramose.

Salvo iniziali difficoltà di messa a punto si può dire che i risultati fino a oggi rilevati sono soddisfacenti. Non si sono rilevate deformazioni viscoplastiche della pavimentazione imputabili al manto impermeabile.

Il problema maggiore di questo tipo di protezione è costituito dalla relativamente onerosa organizzazione di cantiere che richiede impianti di confezionamento centralizzato e mezzi di trasporto termici con agitatore. Ciò rende questa impermeabilizzazione particolarmente adatta per le nuove costruzioni, dove le dimensioni dei lavori giustificano dal punto di vista economico l'impiego di impianti centralizzati.

Sulla rete in esercizio, dove in genere i lavori sono di dimensioni limitate, l'uso dei mastici d'asfalto si rivela meno sicuro, per la mancanza degli impianti anzidetti, o

troppo oneroso e poco pratico qualora si richieda l'uso dei medesimi.

Era necessario, quindi, trovare un altro tipo di impermeabilizzazione che fosse realizzabile senza l'impiego di attrezzature ingombranti e costose, e con una messa in opera rapida anche nelle condizioni atmosferiche più disagiate, con buone garanzie sui risultati, naturalmente.

Il sistema di impermeabilizzazione con le guaine o membrane di bitumi modificati con elastomeri, armate con non tessuti in poliestere, dopo lunga sperimentazione su strada ed in laboratorio, si è rivelato molto valido sotto questi punti di vista, con quelle qualità aggiuntive rispetto ai semplici mastici d'asfalto, in riferimento alle resistenze a trazione che lo rendono particolarmente adatto alla impermeabilizzazione di opere:

— prefabbricate in soletta, cioè con la presenza di numerosi giunti di costruzione;

— con struttura tale da avere in soletta sollecitazioni di trazione (strutture iperstatiche o con forti sbalzi laterali).

L'uso delle guaine però, deve essere effettuato seguendo una serie di direttive e di accorgimenti ben precisi<sup>(4)</sup> che riguardano sia la scelta dei materiali costituenti, che le tecniche di posa in opera, senza i quali si può andare incontro ad insuccessi anche gravi, sia ai fini dell'impermeabilità delle opere d'arte che della durata delle pavimentazioni.

Questo dipende anche dal fatto che la semplicità delle attrezzature per la posa in opera di questo sistema e la sua provenienza dal campo dell'edilizia, dove i problemi di posa e di resistenza sono completamente diversi da quelli autostradali, hanno provocato la proliferazione di tipi di guaine e di imprese poco adatte le prime e poco esperte le seconde per l'impiego su strada.

#### *5-2 Pavimentazioni*

Le pavimentazioni dei viadotti sono in genere costituite da uno strato di collegamento (binder) e da uno strato di usura (tab. 11).

Lo spessore globale varia secondo le caratteristiche dell'opera e in genere oscilla tra i 7 ed i 14 cm.

Le caratteristiche dei conglomerati bituminosi in un primo tempo differivano da quelle della pavimentazione realizzata sul corpo autostradale. Si usavano cioè conglomerati a basso tenore di bitume o di sabbia con lo scopo di eliminare o rendere minime le deformazioni di natura visco-plastica.

Tali tipi di miscele, però, con la presenza dell'impermeabilizzazione — che fa permanere più a lungo l'acqua nella pavimentazione stessa, hanno una chiusura troppo scarsa e conseguentemente una percentuale di vuoti troppo elevata per avere una buona durabilità sui viadotti.

La durata della vita utile di queste pavimentazioni infatti non dovrebbe essere inferiore ai 5-10 anni, mentre la rottura di questi tipi di conglomerati bituminosi avviene in tempi minori.

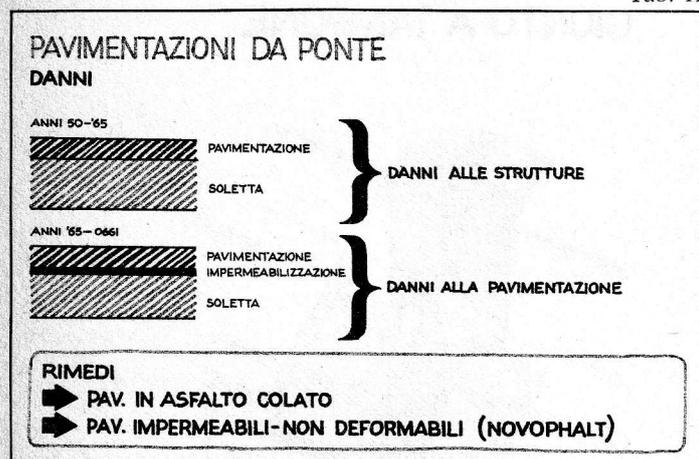
In genere, al manifestarsi dei primi sintomi di invecchiamento (lesioni in corrispondenza delle fasce battute dal traffico) si realizzava un micro-tappeto di particolari caratteristiche meccaniche dello spessore di 1,5 ÷ 2 cm,

<sup>(4)</sup> La Società Autostrade ha messo a punto nel febbraio 1976 le Norme Tecniche d'Appalto per le guaine bituminose armate.

che rendendo più impermeabile l'intero pacchetto bituminoso prolungava la vita utile di questo tipo di pavimentazione. Ma questo tipo di miscela si è rivelato poco adatto in termini di tessitura geometrica (tipo di rugosità superficiale).

La soluzione ideale per la pavimentazione dei ponti rimane quindi una miscela che sia essa stessa impermeabile, ma che abbia buona rugosità geometrica superficiale. Questo materiale esiste e si chiama guss-asphalt (asfalto colato). Con i carichi ed il clima esistenti in Italia ha qualche problema di deformabilità che però può essere risolto additivando il bitume in modo opportuno. Esso presenta però un problema applicativo: richiedendo impianti di fabbricazione e di stesa specifici e molto costosi, è poco adatto, in termini economici, per essere impiegato su pochi metri quadrati di pavimentazione (pochi in termini relativi rispetto al totale delle pavimentazioni).

Tab. 11



In Germania, dove questo materiale viene usato anche come usura corrente, questo problema non sussiste.

In manutenzione si parla infatti di grosso lavoro quando si devono ripavimentare 10.000 m<sup>2</sup> di ponti, quindi si dovrebbe montare un impianto per farlo lavorare poche ore.

La soluzione a questo annoso problema si sta sperimentando in questi giorni: si tratta di una nuova attrezzatura mobile (è montata su di un rimorchio), in grado di preparare una miscela omogenea di bitume e polietilene (dal 4 al 7%); un normale impianto di conglomerati può allora utilizzare questo legante modificato per preparare miscele tradizionali (da compattare) con eccesso di legante rispetto all'ottimo Marshall senza pericolo di deformazioni sotto traffico.

La nuova tecnica, denominata Novophalt, permette allora di avere conglomerati quasi impermeabili, rugosi, non deformabili, fabbricati negli impianti normali di manutenzione, provvisti di un'appendice mobile.

### 5-3 I giunti di dilatazione

Le attrezzature destinate a rendere percorribili dal traffico le zone delle opere d'arte dove si concentrano i movimenti di dilatazione termica e quelli generati dal traffico stesso, vengono denominate sinteticamente « giunti di dilatazione » (fig. 8). Queste attrezzature sono necessarie per due funzioni principali:

— permettere al traffico di superare con il minimo fastidio la zona di discontinuità dell'opera;

— proteggere le parti sottostanti dai materiali aggressivi e dalla sporcizia che in questa discontinuità si insinuano.

Logicamente queste attrezzature non devono compromettere il regolare movimento della struttura previsto in questi punti.

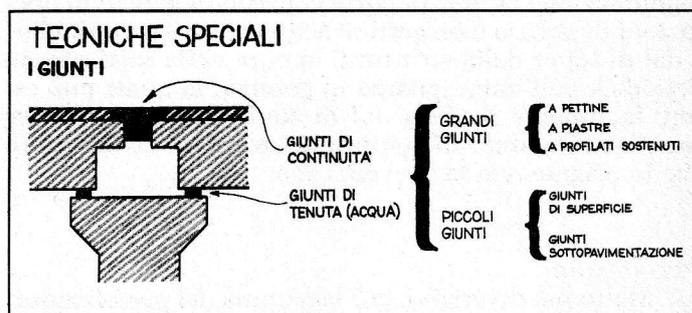


Fig. 8

Dal punto di vista della manutenzione dell'opera d'arte è importante tenere presente le due funzioni principali e, naturalmente, assicurare il buon funzionamento strutturale che potrebbe essere compromesso dalla presenza dell'attrezzatura di giunto bloccata. Proprio per problemi di conservazione delle opere negli ultimi anni si è visto come sia importante la funzione protezione, tanto è vero che i giunti moderni sono in genere costituiti da attrezzature spesso separate, una destinata alla percorribilità dell'opera (giunto di continuità) e una per renderlo impermeabile (giunto di tenuta). A quest'ultimo vengono spesso associati dispositivi di drenaggio o protezione dei calcestruzzi sottostanti viste le difficoltà che spesso si incontrano per rendere durevole nel tempo questa impermeabilità.

Occorre dire che, dal punto di vista manutentorio, le operazioni da effettuare per assicurare il funzionamento del giunto di continuità sono sempre di tipo urgente mentre quelle destinate alla tenuta sono più procrastinabili in quanto le azioni di degradazione sono un fenomeno abbastanza lento (a seconda delle condizioni ambientali). E' ormai divenuta prassi comune fare della manutenzione preventiva dotando i giunti che non ne hanno di dispositivi di tenuta o anche rifacendo ex novo giunti che non permettono questa operazione.

Per parlare con maggior dettaglio delle operazioni di manutenzione occorre separare in due grandi gruppi i giunti di dilatazione.

Si hanno i « grandi giunti », quelli cioè dove il movimento preponderante è proprio quello della dilatazione termica ed i giunti piccoli, presenti su opere dove la dilatazione termica non supera valori di 1-2 cm mentre i movimenti più « importanti » sono quelli generati dalla mobilità dell'opera sotto il traffico.

### Grandi giunti

I grandi giunti sono in genere di tipo metallico dai più tradizionali a pettine ed a piastre, a quelli moderni a lamelle e profilati in gomma intercalati in numero variabile a seconda della dilatazione o anche in acciaio vulcanizzato dentro al neoprene.

Le operazioni di manutenzione del giunto di continuità sono costituite da operazioni di smontaggio e montaggio, pulizia, ingrassaggio, in genere effettuate da

personale specializzato; a volte è necessaria anche la sostituzione di alcuni elementi quali profilati in gomma ecc. Nei tipi più moderni queste operazioni sono facilitate dalla modularità dell'attrezzatura che può essere facilmente suddivisa in elementi uguali.

In genere in questo tipo di giunti l'impermeabilità è assicurata da strisce di neoprene o hypalon assicurate nella parte inferiore delle parti metalliche o alle stesse o meglio ai bordi delle strutture adiacenti del ponte. La manutenzione di questa parte consiste in genere in operazioni di pulizia (con getti di acqua in pressione dai lati o dal di sopra della struttura) oppure nella sostituzione periodica dell'intera guaina in gomma, la quale può essere facilmente inserita dal di sotto (senza cioè dover smontare il giunto di continuità) anche in attrezzature che in origine non la prevedevano.

### Piccoli giunti

Molto più diversificata è la gamma dei piccoli giunti i quali possono essere giunti di superficie (fig. 9) analoghi ai grandi, ma costruiti con dimensioni minori (è il caso dei giunti a gomma armata) a cordoli gettati in opera cioè costruiti con masselli affiancati di malta di resina epossidica o di malta reoplastica; infine si hanno i giunti sotto pavimentazione (fig. 10) su opere di luci non superiori ai trenta metri o poco mobili sotto traffico (o per la natura massiccia della struttura o per il tipo di traffico che la percorre).

Le tecniche di manutenzione sono naturalmente diverse tra loro; per i tipi metallici non cambiano rispetto ai loro confratelli di maggiori dimensioni. Per i giunti in malta di resina si tratta spesso di ricostituire i masselli o parte di essi lesionati dal traffico; questi masselli, in effetti, se messi in opera in condizioni sfavorevoli per temperatura e umidità, possono avere aderenza ridotta al calcestruzzo della soletta; altri inconvenienti possono nascere dall'uso di resine sensibili all'azione dell'ozono e dei raggi ultravioletti (infragilimento), oppure dotati di un coefficiente di dilatazione termica troppo elevato rispetto a quello del calcestruzzo. Tutto questo porta alla formazione di lesioni trasversali del massello ed una facilitata possibilità di distacco. Le riparazioni sono più

sioni o zone di distacco limitate), permette di riparare parti degradate del massello senza dover intervenire sul giunto di tenuta; il profilato di gomma superiore viene in questi casi smontato e rimontato senza problemi. Nel rifacimento dei masselli o di parte di essi si migliora il collegamento con la soletta inserendo dei prigionieri in acciaio in quest'ultima (in fori fatti con trapani o piccole carotatrici) e incollandoli con resine epossidiche pure.

Negli ultimi anni questo accorgimento viene introdotto sin dall'inizio e si è rivelato molto valido per la durabilità sotto traffico. Esso è stato pensato prima per i masselli in malta di cemento reoplastica e successivamente è stato trasferito a quelli in resina.

Esistono delle varianti di questi giunti a masselli che permettono ugualmente operazioni di manutenzione di questo tipo, con migliore facilità di esecuzione in quanto è possibile operare come per i giunti metallici



Fig. 10

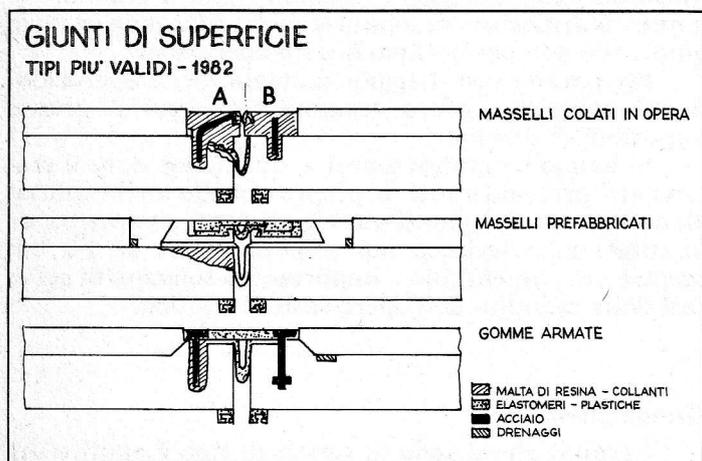


Fig. 9

agevoli se la tenuta all'acqua è assicurata da una guaina (in neoprene o altro materiale) assicurata al di sotto dei masselli (fig. 9). Infatti tale canaletta, oltre a drenare l'acqua che può infiltrarsi tra soletta e massello (anche se quest'ultimo è solidamente collegato, attraverso le-

modulari; di tratta dei giunti costituiti da masselli prefabbricati in elementi di circa 1 m di lunghezza. Questi elementi spesso rivestiti di gomma sono costituiti da malte di cemento o anche (più raramente) da malte di resina e vengono semplicemente incollati alla soletta.

In alcuni tipi è modulare anche la gomma di tenuta a contatto del traffico; questo rende più agevoli le operazioni di sostituzione in caso di incidenti durante le operazioni di manutenzione invernale (molti tipi di giunti infatti subiscono danni per urti con le lame degli spazzaneve).

In questi ultimi tempi si sta diffondendo l'impiego di giunti a gomme armate che richiedono, dato il loro esiguo spessore, la sopraelevazione dei terminali delle solette (fig. 9). Questa operazione può risultare benefica per l'irrigidimento in questa zona di testata, come si è detto nei paragrafi precedenti. Tra l'altro la sopraelevazione, se monolitica con il resto della soletta, riduce la probabilità di filtrazione dell'acqua attraverso la pavimentazione. Nel passato, pur esistendo dei giunti che prevedevano questa struttura, la sopraelevazione dei terminali di soletta non veniva effettuata a causa del lungo periodo necessario per la maturazione, dovendo operare con calcestruzzi normali; oggi tali tempi sono

drasticamente ridotti con l'impiego di malte o calcestruzzi reoplastici.

Sempre importante è il drenaggio delle acque di pavimentazione che non possono più defluire nella fessura di giunto a causa del dispositivo di tenuta. Ogni buon giunto deve esserne dotato se non si vuol compromettere la durata della pavimentazione. Nella fig. 11 è mostrato uno dei più diffusi sistemi di drenaggio.

I giunti di sottopavimentazione sono in genere i meno costosi ed hanno anche costi di manutenzione ridotti se vengono posti in opera su strutture per cui sono adatti. In genere consistono in un dispositivo di tenuta non molto diverso da quelli in uso negli altri giunti, mentre il dispositivo di continuità è costituito dalla pavimentazione stessa o da pavimentazioni di tipo speciale.

Nel primo caso è preferibile preconstituire la rottura della pavimentazione con un taglio di 3-4 cm da sigillare con mastice bituminoso.

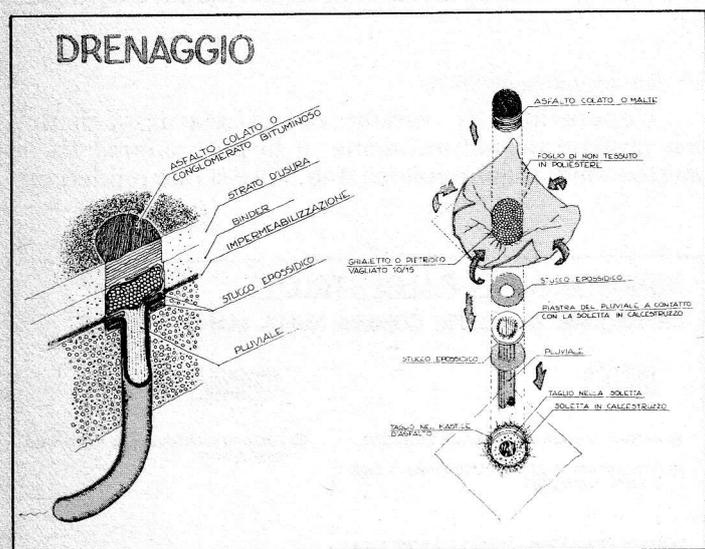


Fig. 11

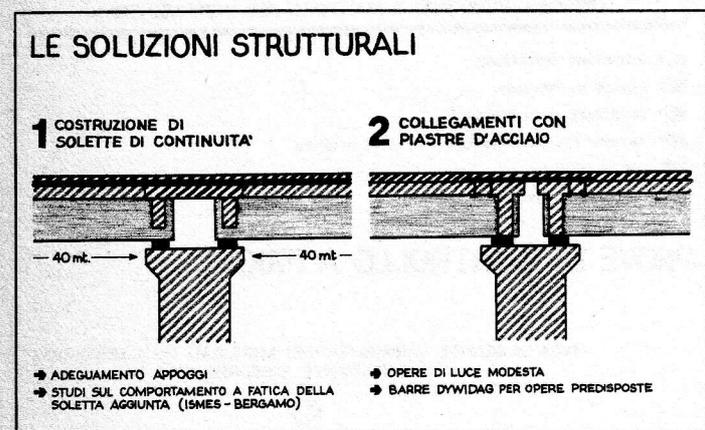


Fig. 12

Le operazioni di manutenzione consisteranno nel ripetere la sigillatura periodicamente estendendola alle eventuali lesioni che si possono formare in periodo invernale.

Dei tipi con pavimentazioni speciali i più facili da mantenere sono quelli in cui la pavimentazione sopra la

fessura di giunto è costituita da asfalto colato (giunti a tampone — nella figura 10 il tipo di progettazione « autostrade »). In questi giunti il « tampone » non segue i movimenti dell'opera d'arte, le dilatazioni (in genere di entità ridotta) avvengono nei punti di contatto tra esso e la pavimentazione normale. L'asfalto colato è soggetto solo ai movimenti di flessione nella sua parte centrale, a causa della deformazione sotto traffico dell'impalcato, e resiste molto bene a questa azione di fatica. Le operazioni di manutenzione nel caso del tampone sono limitate alle sigillature periodiche dei bordi. Lo stesso giunto a tampone, per il suo basso costo può essere impiegato per operazioni di manutenzione preventiva su opere non dotate in origine (per la loro luce ridotta) di dispositivi di tenuta all'acqua (quali per esempio cavalcavia, sottovia ecc.).

A volte la sistemazione delle zone di giunto può sfociare in soluzioni di tipo strutturale che consistono nel creare ex novo la continuità dell'opera in soletta. Questa soluzione (mostrata in figura 12), come è ovvio, non può essere usata in ogni opera e richiede anche un adeguamento degli appoggi.

Esistono poi problemi, che si stanno studiando, circa la resistenza a fatica delle solette di continuità realizzate in cemento armato.

#### 5-4 Apparecchi d'appoggio

Nella maggior parte dei casi gli apparecchi di appoggio si trovano in corrispondenza delle zone di giunto, per cui le operazioni di manutenzione su queste ultime possono essere considerate anche come protezione degli apparati sottostanti. Per quel che riguarda invece i lavori da fare direttamente sugli appoggi occorre distinguere a seconda dei tipi (fig. 13).

Per gli apparecchi tradizionali in acciaio (a rulli, a pendoli ecc.) si tratta principalmente di protezione contro la corrosione e di mantenimento delle mobilità previste, quindi occorre riverniciarli magari integralmente, cioè con cicli completi di sverniciatura e ripittura. Dopo la verniciatura o indipendentemente da essa si eseguono operazioni di ingrassaggio e grafitaggio.

Molto spesso però questi appoggi presentano degli inconvenienti abbastanza tipici; si ha per esempio il disallineamento dei diversi elementi (nel caso di pendoli multipli) o lo spostamento eccessivo dei rulli o il loro schiacciamento. In questi casi, per ripristinare le corrette condizioni di funzionamento occorre sollevare gli impalcati per rimettere a posto gli elementi spostati o per sostituirli. Spesso si presentano inconvenienti più gravi provenienti dalla non corretta distribuzione degli sforzi sul calcestruzzo di supporto (questa possibilità è strettamente legata alla tipica struttura degli appoggi metallici). In questi casi si può procedere con iniezioni in resine sintetiche o in malte cementizie del supporto lesionato oppure alla sua cerchiatura e, nei casi più gravi, alla sua ricostituzione.

Negli ultimi anni hanno avuto grandi sviluppi apparecchi di appoggio in acciaio o alluminio, con grandi superfici di scorrimento cilindriche o sferiche che sfruttano le proprietà anti attrito del contatto acciaio-PTFE (teflon), denominati sinteticamente « appoggi in teflon ». Tali apparecchi che possono essere costruiti e montati in modo da assicurare al meglio le condizioni di mobilità previste per l'opera nel progetto, sembrano anche assicurare una maggiore affidabilità dal punto di vista della ridotta necessità di manutenzione.



cessaria nei più svariati punti dell'opera d'arte.

La difficoltà e le probabilità di durezza dell'intervento stesso possono variare di molto, a seconda di dove si interviene, dell'entità dimensionale dell'intervento e delle cause della degradazione che lo hanno reso necessario.

Fino a pochi anni fa non si disponeva per questi lavori, che di malte di cemento normali, eventualmente additivate con palstificanti o antiritiro a base di inerti metallici; per questo motivo spesso queste operazioni venivano eseguite con risultati in genere mediocri da normali imprese di costruzione.

Oggi la gamma di possibilità si è molto estesa, materiali sintetici o malte speciali di cemento permettono di disporre di prodotti ad elevate caratteristiche di aderenza, basso ritiro, forti resistenze meccaniche e bassa permeabilità che rendono più sicuro l'intervento di restauro.

Detti prodotti però richiedono una notevole esperienza in chi li impiega, altrimenti le loro qualità potenziali risultano grandemente ridotte. Da ciò si deduce l'importanza che hanno i materiali in queste operazioni; in effetti oggi è possibile « adattare » il materiale all'intervento a seconda che sia un intervento superficiale o profondo (strutturale), a seconda della entità delle resistenze richieste e del tempo a disposizione per raggiungerle, a seconda infine del tipo di supporto sia in termini dello stato e della natura dei costituenti che delle vibrazioni presenti durante i lavori.

Data allora la grande variabilità dei materiali disponibili è necessario disporre di norme e di prove di controllo che possono guidare l'utilizzatore nella scelta e nella verifica della validità dei prodotti.

L'altro elemento fondamentale è la *tecnica di messa in opera*.

#### 5-7 Ripristini localizzati dei calcestruzzi e calcestruzzi spruzzati

Condizione comune a tutti gli interventi di restauro è che la preparazione delle superfici è essenziale nella determinazione del successo dell'intervento.

Le operazioni necessarie sono in genere:

- l'eliminazione del calcestruzzo ammalorato fino a raggiungere quello sano;
- l'eliminazione totale di olii o grassi eventualmente presenti, che costituirebbero una superficie di scarsa adesione;

- l'eliminazione della maltina superficiale e degli eventuali prodotti di curing;

- l'asportazione della ruggine sulle armature presenti ed eventuale passivazione delle stesse (con prodotti riducenti ed antiossidanti).

Il calcestruzzo ammalorato può essere asportato per scalpellatura manuale o meccanica con demolitori di piccole dimensioni o anche con acqua ad alta pressione (idrolancia) o tramite sabbiatura. Quest'ultimo procedimento permette anche di ravvivare contemporaneamente i ferri di armatura.

Le superfici così riparate devono subire a questo punto trattamenti diversi a seconda dei materiali che si usano per il ripristino vero e proprio.

Non possiamo, in questa sede, entrare nel dettaglio di tutte le operazioni, ci limiteremo a ricordare gli elementi essenziali e le caratteristiche generali che i prodotti devono avere.

E' necessaria in genere una mano d'attacco che aumenti l'aderenza tra il supporto ed il restauro; nella maggior parte dei casi essa è costituita da una resina epossidica (meno spesso poliuretana o poliestere), ap-

positamente formulata (base + induritore). Su di essa possono essere messe in opera malte cementizie o anche malte a legante sintetico. Le malte da usare devono possedere in massimo grado le seguenti caratteristiche:

- Elevate resistenze meccaniche
- Indurimento rapido
- Ritiro ridotto o nullo (in getti contenuti è auspicabile un leggero effetto espansivo)
- Porosità contenuta.

Alcune di queste caratteristiche sono necessarie per la durabilità della riparazione, altre per la necessità della messa in opera che spesso viene fatta in condizioni non ideali, vista la presenza del traffico; a questo proposito come si è detto, importante è l'influenza delle vibrazioni, dovute a quest'ultimo, sui procedimenti di presa e di maturazione dei prodotti di ripristino.

Recenti studi hanno dimostrato che le vibrazioni influiscono in maniera secondaria sui prodotti di restauro in malte sintetiche o cementizie mentre sono molto negative per i calcestruzzi spruzzati tradizionali (guniti). L'impiego di questa tecnica, una volta molto diffuso, si sta riducendo fortemente a causa della scarsa durabilità dei risultati che normalmente si ottengono; fortunatamente la sua variante più recente cioè la spruzzatura per via secca, sembra essere esente da questo inconveniente.

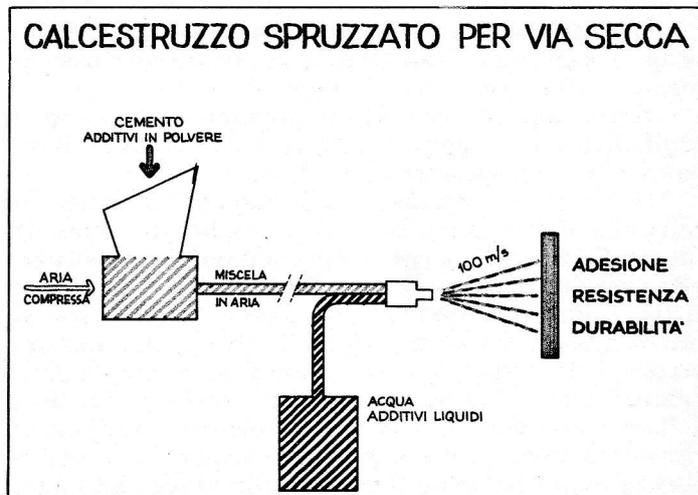


Fig. 14

La spruzzatura per via « secca » (la via « umida » è il sistema più tradizionale e conosciuto), è assicurata da un getto di aria compressa dentro un tubo, fino alla lancia di proiezione, a livello della quale sono introdotti l'acqua per l'idratazione e gli eventuali additivi liquidi (fig. 14).

L'utilizzazione di miscele cemento-sabbia non ancora bagnate, permette una proiezione sul supporto a velocità molto elevata (dell'ordine dei 100 m/sec.). Ciò aumenta l'adesione al calcestruzzo da trattare e conferisce caratteristiche migliori al prodotto spruzzato (resistenze, porosità-durabilità in una sola parola).

Tornando alle malte per i ripristini occorre dire che le più usate sono quelle con leganti epossidici uniti a inerti di natura silicea; non esistono come si è detto ancora delle normative che ne stabiliscano le composizioni e le resistenze per questi usi specifici. Inconvenienti che possono nascere nell'uso di questo tipo di malte sono legati all'estrema variabilità di risultati che si possono avere se la formulazione degli induritori non è adatta all'impiego specifico (uso di agenti flussanti o plastifi-

canti che non reticolano con la resina, uso di prodotti più o meno compatibili con l'umidità ecc.); in questi casi si possono ottenere dei risultati poco brillanti.

Altri prodotti che sono molto usati sono le malte cementizie « speciali » che hanno il vantaggio di essere più affini alle esperienze passate della maggior parte degli applicatori. Sono in genere fornite premiscelate (inerti e legante) in modo che sia facile non sbagliare le formulazioni; le più diffuse sono quelle contenenti dei superfluidificanti (malte reoplastiche), che permettono la lavorabilità (fluidità) del prodotto con rapporti acqua/cemento molto bassi.

Le loro caratteristiche di resistenza e di impermeabilità provengono principalmente da questo fatto fondamentale; naturalmente, per la ridotta quantità di acqua che contengono, sono molto sensibili al tipo di maturazione a cui vengono sottoposte. E' necessario perciò non usare con esse delle casseforme in legno. Anche i calcestruzzi spruzzati eseguiti con questo tipo di prodotti, si rivelano più impermeabili e più durevoli.

#### 5-6-2 *Tecnica dell'impregnazione del calcestruzzo con polimeri (Polymer Impregnated Concrete).*

Questa nuova tecnica che è stata sviluppata in un primo tempo negli Stati Uniti, è applicata sperimentalmente in Italia su solette da ponte (5).

Il sistema consiste nell'impregnare con polimero termoindurente la parte superiore delle solette degli impalcati per uno spessore di 3 ÷ 5 cm.

Si tratta di essiccare completamente le solette in calcestruzzo (riscaldandole con gradualità fino a temperature di 150 ÷ 180° C) e proteggendo poi il calcestruzzo essiccato dall'umidità e dalla pioggia fino a che esso non si sia di nuovo raffreddato; si ricopre allora la soletta con il monomero termoindurente, di cui si è parlato, perchè il calcestruzzo privo di umidità ne venga impregnato. La viscosità del monomero è scelta in funzione della porosità del calcestruzzo. La soletta viene di nuovo riscaldata, dopo averla bagnata con acqua che serve a ripartire uniformemente il calore nella massa del monomero per assicurare una polimerizzazione uniforme.

Il prodotto così ottenuto ha una resistenza eccezionale a tutti gli attacchi fisico-chimici a cui può essere sottoposta una soletta di un ponte.

Questa breve descrizione della tecnica del P.I.C. mette in evidenza le difficoltà che si incontrano per l'applicazione su opere già in esercizio; in effetti l'impregnazione del calcestruzzo è molto più agevole nel periodo di costruzione dell'opera (in particolare se questa avviene per elementi prefabbricati che possono essere trattati nel cantiere di prefabbricazione in maniera ideale e più economica).

Si stanno effettuando in questo periodo, non sulla rete IRI, dei lavori di manutenzione che prevedono l'uso di solette prefabbricate trattate con il PIC, da collegare alle vecchie solette scalpellate, tramite malte di tipo reoplastico; si supera così brillantemente il problema del trattamento in opera del calcestruzzo.

(5) La maggiore autorità italiana in questa tecnica è il Prof. A. Rio dell'Università di Roma che ha condotto numerose esperienze e realizzazioni con questi materiali.

#### 5-6-3 *Tecniche d'iniezione di fessure o cavità*

Queste operazioni non hanno quasi mai lo scopo del rafforzamento, ma servono unicamente a impedire la corrosione degli acciai che potrebbe essere generata dalla libera circolazione delle acque nelle fessure.

Anche per questo uso specifico le resine epossidiche sono i materiali più frequentemente impiegati sia per le riparazioni di fessure passive (o morte) che per quelle attive; come in tutti gli altri impieghi la buona riuscita è legata alla formulazione della resina ed alle tecniche di messa in opera.

In queste operazioni il trattamento preventivo è spesso impossibile; in fessure che hanno una certa età non è possibile eliminare la calcite o le altre impurità che si sono formate. Per l'esecuzione dell'iniezione in genere si inseriscono alle due estremità della fessura ed in punti intermedi (ogni 30-40 cm) dei tubi iniettori, poi si stucca la fessura stessa (in caso di fessure attive la stuccatura è preceduta da una scalpellatura che formi prima una scanalatura a forma di V lungo la fessura stessa, in modo da avere una maggior larghezza di materiale di intasamento nella parte più esposta). Il prodotto che si inietta è in genere formulato con induritori compatibili con l'umidità e contenenti additivi di tipo reattivo (cioè che partecipano alla reticolazione della resina). La sua viscosità deve essere compatibile con la dimensione della fessura; man mano che queste crescono gli additivi si possono aumentare fino a che si passa ad usare resine contenenti cariche minerali (in genere al di sopra di 2-3 mm).

#### 5-6-4 *Tecniche d'iniezione delle guaine di precompressione*

Altro problema fondamentale per ciò che riguarda le tecniche d'iniezione è la possibilità di ricostruire con questi prodotti un ambiente che protegga gli acciai dell'armatura dalla corrosione.

Il problema, importante se si tratta di proteggere ferri di armatura ordinaria (ricostruzione di copriferro, per esempio) diventa vitale nel caso degli acciai sotto forte tensione dei precompressi.

Normalmente, come già accennato e come è ben noto, l'acciaio immerso negli agglomerati cementizi non si corrode per via del particolare pH dell'ambiente in cui si trova immerso.

Per gli acciai ad alta resistenza, sotto forte tensione, il fenomeno della corrosione è retto da leggi più complesse; in essi, oltre al normale processo di arrugginimento, si ha anche un diverso processo distruttivo dovuto alla corrosione sotto sforzo che si manifesta per azione contemporanea dell'attacco elettrochimico e dalla sollecitazione a trazione.

Ci sono tre tipi di corrosione che interessano in modo diverso i fili costituenti il cavo di precompressione:

- la corrosione generalizzata cioè il passaggio del ferro in soluzione su tutta la superficie esposta;
- la corrosione solo in certe zone ristrette della superficie (questi due tipi di corrosione sono quelli che attaccano in generale i fili costituenti gli strati più esterni dei cavi);
- la corrosione fessurante, cioè la distruzione dei

legami metallici senza perdita di materia; (interessa i fili più interni).

Quest'ultimo tipo di corrosione ha una importanza particolare, perchè può provocare delle rotture improvvise, senza che si sia manifestata nelle strutture una deformazione premonitrice, rilevabile con i mezzi di sorveglianza tradizionali.

L'espressione « corrosione sotto tensione » ingloba le tre forme di alterazione suddette; si possono quindi avere:

- 1 — rottura per dissoluzione generalizzata;
- 2 — rottura dovuta a corrosione per punti (pitting);
- 3 — rottura dovuta a corrosione fessurante sotto tensione.

Il diagramma di equilibrio elettrochimico riportato nella figura 15 indica i campi di stabilità dei diversi ioni del metallo in funzione del pH e dello stato di tensione elettrica.

## CORROSION DES ACIERS SOUS CONTRAINTES ÉLEVÉES

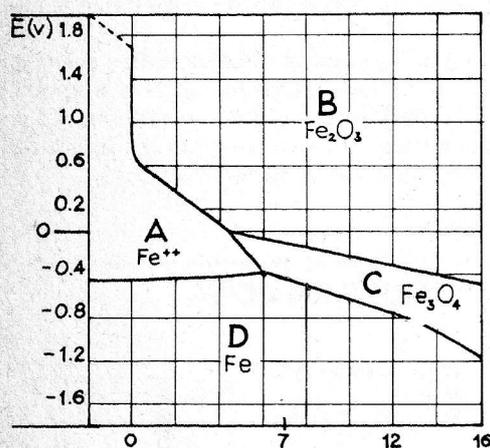


Fig. 15

Nella zona (A) dove l'acciaio passa in soluzione sotto forma dello ione ferroso ( $Fe^{++}$ ) l'acciaio sotto tensione si può rompere per dissoluzione generalizzata;

— nel campo detto di passivazione (B), dove il ferro è protetto dall'ossido  $Fe_2O_3$ , l'acciaio sotto tensione si può rompere a causa della corrosione per punti, se l'ambiente che lo circonda contiene degli elementi come i cloruri, che distruggono localmente lo strato di passivazione.

— nel piccolo campo (C) detto di « passivazione da parte dell' $Fe_3O_4$  (ossido nero) » si può produrre la corrosione fessurante;

— nel campo detto di « immunità » (per gli acciai di armature normali, dove il ferro è stabile in presenza di acqua), l'acciaio, sottoposto ad una sollecitazione di trazione, si può rompere per il meccanismo di « infragilimento dovuto ad idrogeno ».

Quello del riempimento delle guaine nei c.a.p. post tesi è uno dei principali problemi della manutenzione delle moderne opere d'arte e la sua soluzione permette anche di guardare con maggiore tranquillità ai risultati ottenibili nelle opere ancora da costruire.

In genere, se si tratta di riempimenti di guaine parzialmente iniettate di boiaccia di cemento, si usano formulati privi di cariche minerali, sfruttando la bassissima viscosità che si può ottenere (inferiore a 180 cps a

20°C). In caso di presenza di vuoti macroscopici si usano cariche minerali di natura basica, cercando di avere dei pH il più possibile prossimi a 12.

In effetti la protezione che la maggior parte delle resine possono esplicare è del tipo « perfetto rivestimento aderente », che non permette l'ingresso dei fattori corrosivi, in quanto normalmente il prodotto sintetico puro non è in grado di creare l'ambiente « passivo » a pH 12,5 dei materiali cementizi.

Le modalità d'iniezione hanno richiesto per la messa a punto una serie notevole di sperimentazioni di laboratorio e in grandezza reale. Oggi si usano due metodi di iniezione: « a pressione » (o tradizionale) e « sottovuoto ».

### Iniezione a pressione

Il primo sistema prevede un tracciamento, all'esterno della trave, del percorso dei cavi di precompressione e la formazione, con l'uso di microdemolitori ad aria compressa, di tasselli che mettono a nudo le guaine, normalmente con un passo di 3-4 m su ogni cavo, scoprendo sempre i cavi nella mezzeria della trave (punto più critico). Non tutti i tasselli eseguiti vengono attrezzati per l'iniezione, in quanto i vuoti possono risultare comunicanti tra due tasselli consecutivi. Su quelli scelti vengono applicati i tubetti di iniezione in rame o in plastica (per facilitarne la chiusura), provvisti di apposita cuffia e sigillati con stucchi epossidici a basso ritiro e rapida presa, impermeabili al materiale da iniettare. Tubetti da iniettare vengono anche applicati nei fori degli ancoraggi dei cavi, preliminarmente scoperti e puliti. I tasselli non utilizzati vengono a questo punto richiusi.

In genere inoltre si procede a stuccature e riparazioni di zone di calcestruzzo poroso, fessure, in modo da chiudere possibili vie di uscita delle iniezioni.

Queste stuccature vengono eseguite sempre con paste a base epossidica a volte rinforzate con sottili reti metalliche o fogli in non tessuto.

Dopo almeno 48 ore dalle stuccature si procede alla soffiatura dell'interno delle guaine per eliminare eventuali sacche d'acqua e per valutare la consistenza dei vuoti nei vari tratti. Si procede poi all'iniezione scegliendo il punto iniziale in base alle risultanze della soffiatura. In genere si parte dalla mezzeria, dove spesso sono in comunicazione gran parte delle guaine, e si procede fino alla fuoriuscita (se possibile) della miscela, dai primi tubetti adiacenti quello o quelli d'iniezione; si cambia allora punto di iniezione passando a questi ultimi e proseguendo in successione, fino ad ottenere le fuoriuscite dalle testate dei cavi. I tubetti già iniettati vengono, naturalmente, man mano sigillati (il rame o la plastica facilitano questa operazione).

La pressione che si usa è la più bassa possibile (in previsione della possibile formazione di tappi interni) e non vengono superate le 5 atmosfere.

### Iniezioni sottovuoto (figura 16)

Si provvede all'iniezione con apposite attrezzature aspiranti in grado di dar luogo alla formazione di vuoto dell'ordine di 1 atmosfera nella cavità da iniettare e di immettere poi il materiale di riempimento; con questo sistema si riduce notevolmente il rischio di formazione di tappi e bolle non riempite anche perchè, nella fase di

aspirazione, si eliminano sacche di acqua o altre impurità fluide che possono ridurre la efficienza della protezione.

Le modalità di preparazione dei fori di iniezione e la loro ubicazione sono analoghe alle precedenti, con la variante che è possibile, una volta decisi i punti in cui applicare gli iniettori, effettuare una prima valutazione della possibilità di creare il vuoto e dell'entità del volume delle cavità presenti. La prima valutazione tende ad individuare la necessità o meno di effettuare gli interventi di tenuta e le zone dove dovranno essere eseguite tali stuccature; la seconda a stimare i consumi e, principalmente, a controllare, a iniezione terminata, che tutti i vuoti valutati siano stati riempiti.

## INJECTION DES GAINES

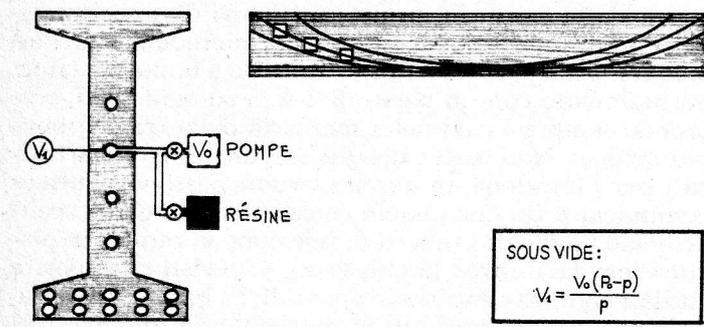


Fig. 16

A seconda dell'attrezzatura disponibile la valutazione si effettua tramite misura (con contalitri) del volume d'aria immesso nella cavità, dopo aver effettuato il vuoto, oppure in base alla legge di Mariotte operando nel modo seguente:

in un serbatoio, collegato con un manometro (eventualmente il serbatoio destinato a contenere il materiale da iniettare) si valuta il volume libero (volume dell'aria  $V_0$ ) e si misura la pressione  $P_0$  a cui si trova quest'aria; si apre poi la comunicazione con la cavità già sottovuoto di volume incognito  $V_1$ .

Quando il passaggio dell'aria è terminato, si misura la pressione  $p$  di equilibrio. Il volume  $V_1$ , sarà allora con buona approssimazione pari a:

$$V_1 = \frac{V_0 (P_0 - p)}{p}$$

Questa relazione è attendibile:

- se la temperatura durante le varie operazioni si è mantenuta abbastanza costante;
- se la velocità dell'aria non è eccessiva ( $P_0$  non troppo elevata);
- se la grandezza  $V_1$  è confrontabile con  $V_0$ .

Qualora da una prima valutazione questa terza condizione non sia verificata, si può ripetere la misura variando il volume  $V_0$ .

E' possibile a questo punto procedere alle iniezioni vere e proprie con il materiale di riempimento prescelto; il materiale introdotto nella cavità per azione del vuoto dovrà, a passaggio terminato, essere posto sotto una

pressione di 2-3 atmosfere prima del bloccaggio dei tubi di iniezione.

Questo modo di procedere ha quindi il vantaggio di permettere la valutazione dei vuoti presenti nelle guaine e della buona riuscita o meno dell'operazione.

### 5-6-5 Tecnica dei rinforzi lamellari (Piastre di acciaio incollate)

Un sistema molto diffuso per rafforzare o riclassificare strutture da ponte in cemento armato è quello dell'incollaggio di lastre o altri profilati in acciaio, tramite collanti strutturali, nei punti più adatti delle opere. Più adatti naturalmente rispetto al tipo di opera ed ai motivi per cui l'intervento si rende necessario.

La tecnica consiste nell'incollare lastre d'acciaio di spessore contenuto (max 10 mm, anche in 2 strati 5 + 5) al calcestruzzo.

Se sono necessari localmente spessori maggiori si preferisce incollare una piastra supplementare.

L'impiego più corrente è come armatura supplementare a trazione; meno spesso si usa per incrementare la resistenza a taglio (fig. 17).

Le prove e le esperienze sembrano dimostrare come siano preferibili piastre sottili e larghe rispetto a quelle spesse e strette.

La preparazione delle superfici da incollare è fondamentale; per aderire al calcestruzzo sano e non alla parte più esterna, degradata o a debole resistenza, si ricorre alla sabbiatura fino ad avere in vista gli inerti del calcestruzzo per il 30-40% della superficie.

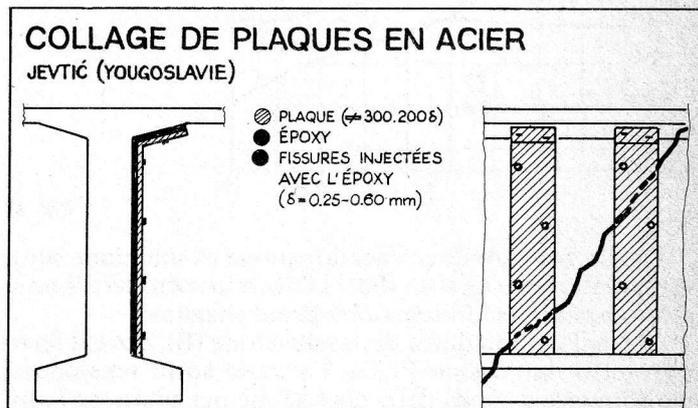


Fig. 17

E' anche necessaria una buona complanarità delle superfici.

Anche l'acciaio viene sabbiato e (a volte) protetto con vernici epossidiche, per il tempo che intercorre tra questa operazione e la messa in opera. Le vernici sono da togliere con solventi prima dell'applicazione ciò però ha dato luogo a problemi. Si usano anche dei film di resina termoindurente che si staccano come una pellicola al momento dell'incollaggio.

Queste attenzioni permettono di effettuare la preparazione dell'acciaio con notevole vantaggio sia economico che sulla durabilità dell'operazione. Fondamentale è anche il tipo di resina (e tutti usano le resine epossidiche) che trasferisca gli sforzi di taglio dal calcestruzzo all'acciaio.

I metodi per mettere in opera le piastre sono vari; si tratta di premere la lastra di acciaio contro il calce-

struzzo in modo da schiacciare il collante (spessore finito 1-2 mm) e a volte si usano dei sistemi di ancoraggio meccanici.

I dubbi più diffusi sono per l'efficacia a lungo termine a causa di:

- effetti dell'invecchiamento sulle colle;
- possibilità di corrosione nelle piastre d'acciaio (specialmente se si impiega acciaio dolce);
- possibili effetti di fatica nelle zone di incollaggio.

E' possibile fare subito una considerazione di tipo pratico: eventuali deterioramenti possono essere scoperti con facilità, vista la posizione esterna di queste piastre.

Le varie prove di laboratorio poi escluderebbero i problemi legati alla fatica se le sollecitazioni di funzionamento sono contenute rispetto a quelle di rottura.

In effetti travi a T sollecitate per 2 milioni di cicli non hanno presentato danni alle armature incollate. Caricate staticamente dopo questa prova si sono rotte per schiacciamento del calcestruzzo in zona compressa dopo che le piastre longitudinali si erano deformate regolarmente senza staccarsi.

Prove di invecchiamento sono in corso in Svizzera previste in un arco di 15 anni. Naturalmente anche tutti i lavori eseguiti servono a questo scopo. La conclusione finale è che questa tecnica è efficiente, naturalmente se condotta con cura particolare, materiali idonei e personale molto specializzato.

#### 5-6-6 Tecniche di protezione dei calcestruzzi

Ai diversi interventi di ripristino descritti spesso si fanno seguire delle verniciature o protezioni dei calcestruzzi. Questo procedimento è molto logico in questi casi in quanto normalmente la necessità del ripristino è stata suggerita dalla presenza di un calcestruzzo facilmente aggredibile dall'ambiente e che molto probabilmente continuerà a degradarsi nelle zone non restaurate.

Il processo di protezione però viene anche usato su opere nuove o su opere non restaurate, come intervento preventivo; i trattamenti su strutture nuove o su strutture restaurate non sono in genere diversi tra loro. Un elemento di diversificazione invece esiste a seconda della diversa natura e finalità delle strutture da proteggere, nonché la loro ubicazione nell'ambito del ponte.

Risulta infatti evidente, ad esempio, che le testate delle travi in cemento armato precompresso a cavi scorrevoli richiedono l'adozione di tecnologie e di materiali che consentano la miglior protezione possibile, mentre i margini di sicurezza possono ridursi per strutture massicce quali il corpo delle pile o il paramento di una spalla.

Altra diversificazione viene introdotta dalle qualità e dai costituenti il calcestruzzo da proteggere: un calcestruzzo poroso ed in cemento portland, per esempio, è più aggredibile di un manufatto compatto in cemento pozzolanico.

Per questi motivi in genere esistono due categorie di protezione dei calcestruzzi:

1<sup>a</sup> categoria: Protezione al massimo livello per: testate di travi e di impalcati, trasversi di testata, piano dei pulvini, di pile e spalle, cordoli dei coronamenti (fino ai gocciolatoi compresi), zone di appoggio tipo Gerber, strutture sottili in genere.

2<sup>a</sup> categoria: Protezione a livello medio corpo travi e trasversi intermedi, pile e spalle a struttura leggera.

Alla prima categoria possono appartenere anche le pile e le spalle dei cavalcavia. Naturalmente può avvenire che, in particolari condizioni climatiche o di presenza o meno di inquinamento atmosferico, alcune strutture appartenenti alla 2<sup>a</sup> categoria debbono essere protette al massimo livello.

La protezione superficiale dei calcestruzzi può essere realizzata secondo due principali meccanismi d'azione:

— con prodotti che, impregnando il calcestruzzo (reagendo o meno con i suoi costituenti più attaccabili dalle sostanze aggressive), riducano di molto la porosità superficiale del manufatto e stabilizzino la parte corticale;

— con prodotti, dotati di una forte adesione al calcestruzzo, che realizzino una pellicola continua, abbastanza impermeabile, inattaccabile dagli agenti aggressivi.

Naturalmente le due tecniche di protezione possono essere combinate tra loro. Suddividendo allora i prodotti secondo questi due meccanismi di azione e considerando inoltre i costituenti principali o per lo meno quelli che più contribuiscono a caratterizzare il prodotto stesso, si ha:

A	Prodotti per la impregnazione	1) sali inorganici	2) resine epossidiche diluite	3) altre resine (poliuretaniche, acriliche), sempre diluite
B	Prodotti filmogeni	1) resine epossidiche	2) resine poliuretaniche	3) gomme clorurate

Vediamo ora quali sono in generale i requisiti che le protezioni debbono avere per risultare efficaci. Si richiedono:

- forte resistenza alle azioni climatiche degli agenti aggressivi;
- forte resistenza all'invecchiamento;
- forte aggrappo al supporto oppure buone caratteristiche di impregnazione dello stesso.

Nel caso di prodotti fortemente impermeabilizzanti si richiede che essi non costituiscano anche una barriera impermeabile all'evaporazione in modo da non avere rigonfiamenti e distacchi delle pellicole, oppure, in caso di impermeabilità totale, che questa caratteristica venga dichiarata per poterne tener conto.

Circa le caratteristiche di elasticità della protezione (in caso di film) si pensa che sia molto difficile poter avere un prodotto di così elevata elasticità, vista l'esiguità degli spessori messi in opera, da poter sopportare senza rompersi le fessure che si possono formare nel calcestruzzo a protezione già stesa; quindi si richiedono solo requisiti di elasticità tali da sopportare i soli movimenti di dilatazione delle strutture o eventualmente i movimenti di microfessure già presenti all'atto della messa in opera della protezione.

Sulla base delle esperienze raccolte risulta che le protezioni migliori da un punto di vista tecnico, secondo le categorie prima descritte, siano le seguenti:

1<sup>a</sup> categoria — Per una protezione al massimo livello occorre un doppio ciclo di intervento, con una prima stesa di un prodotto a impregnazione, che può essere del tipo A2 o A3 (resine diluite), per ridurre la porosità superficiale, intasare le eventuali microfessure esistenti e preparare il passaggio della seconda mano.

Occorre prendere in considerazione naturalmente lo stato delle superfici da trattare, che si presumono sane ed esenti da boiacche, vespai ecc., per valutare l'assorbimento del prodotto. Molto importante è a questo fine il tipo di disarmante usato per le casseforme, in caso di protezione di opere nuove; sono da escludere infatti quelli a base di minerali che impregnano già essi stessi la superficie da trattare ed impediscono l'ingresso del prodotto protettivo.

Come secondo ciclo si può usare un trattamento con resine di tipo B2; infatti le resine poliuretaniche sono quelle che più resistono a fenomeni di invecchiamento, molto più di quelle di tipo B1 e B3: le prime sono soggette a sfarinamento e perdita di caratteristiche meccaniche, le ultime a invecchiamento relativamente più rapido.

2<sup>a</sup> categoria — Per questa categoria di trattamenti le possibilità sono diverse a seconda della maggiore o minore aggressività dell'ambiente, cioè prodotti di tipo A2-A3 nel primo caso e di A1 nel secondo, in conclusione cioè solo prodotti di impregnazione, con meccanismo di protezione chimico-meccanica (A2-A3) o spiccatamente chimica (A1).

### Bibliografia

- G. AGHILONE, *Problemi dell'esercizio di autostrade in terreni montagnosi*, Autostrade, Dicembre 1976.
- G. CAMOMILLA, *Tecniche speciali nella manutenzione di ponti e viadotti*, Autostrade, Dicembre 1981.
- OCSE, *Bridge Maintenance*, Road Research, Settembre 1981 (inglese e francese)
- OCSE, *Evaluation de la capacité portante des ponts routiers existants*, Recherche Routière, Dicembre 1979
- Federal Highway Administration, *Detection of flaws in reinforcing steel in prestressed concrete bridge members*, Report No FHWA/RD-81/087 Aprile 1981
- BRÜEL and KJAER, *Mechanical Vibration and Shocks Measurements*.
- G. CAMOMILLA, *Il giunto a tampone « Autostrade »*, Autostrade, Giugno 1980
- Norme Svizzere sui particolari costruttivi dei ponti.
- N. BOTTURA, E. BOCCATO, G. CAMOMILLA, *I giunti di dilatazione delle opere d'arte autostradali*, Autostrade, Maggio 1975
- Autoroute Trans-Européenne Nord-Sud (TEM) « Normes et Procédures Recommandées ».