

**Sistemi di protezione  
nelle opere di infrastruttura  
e costruzioni civili**

La presente documentazione «sistemi di protezione nelle opere di infrastruttura e costruzioni civili» è stata elaborata dal gruppo di lavoro «tecnologie» del PI EDIL - manutenzione e rinnovamento, nel campo delle opere di infrastruttura». Nell'indice sono citati gli autori della presente pubblicazione. Un'ulteriore cerchia più ristretta di esperti nei vari campi della tematica, ha accompagnato il gruppo di lavoro fornendo preziosi suggerimenti nell'ambito delle discussioni.

#### **Membri del gruppo di lavoro - tecnologie**

- Dr. R. P. Frey - studio d'ingegneria Frey & Schwartz, Zugo
- M. Lugeon, studio d'ingegneria Rochat & Lugeon SA, Cossonay - Gare
- M. Matalon, Emch & Berger SA, Bienna
- P. Matt, ingegnere-consulente, Ittigen
- Dr. A. Muttoni, studio Grignoli Martinola Muttoni, Lugano

#### **Direzione del gruppo di lavoro e redazione complessiva**

- P. Matt, ingegnere-consulente, Ittigen

#### **Membri del gruppo di esperti**

- Dr. A. Arnold, Istituto per la tutela dei monumenti ETH Zurigo
- A. Bernhard, Tecnotest SA, Zurigo
- M. Donzel, Ufficio federale delle costruzioni stradali
- B. Furrer, tutela dei monumenti per la città di Berna
- M. Gut, Direzione Dipartimento costruzioni, Canton Nidvaldo
- Dr. F. Hunkeler, Società svizzera per la protezione contro la corrosione, Zurigo
- C. Meuli, Ufficio federale delle costruzioni stradali, Berna
- Prof. Dr. P. Schiessl, Istituto per la ricerca edilizia RWTH Aachen (Germania)
- O.W. Schuwerk, Thalwil
- W. Studer, EMPA, Dübendorf
- Dr. R. Suter, Schindelholz & Dénériaz SA, Losanna
- M. Tschumi, Direzione Generale FFS, Berna
- S. Zingg, Ufficio centrale svizzero per le costruzioni in acciaio, Zurigo
- P. Zwicky, studio d'ingegneria, Sarnen

#### **Indice degli Autori**

- Dr. R. P. Frey, studio d'ingegneria Frey & Schwartz, Zugo e  
Dr. A. Muttoni, studio Grignoli Martinola Muttoni, Lugano (cap. 3)
- U. Meierhofer, EMPA Dübendorf e  
J. Fischer Lignum, Zurigo (cap. 6)
- P. Matt, ingegnere-consulente, Ittigen

Un ringraziamento particolare va inoltre a tutti gli specialisti che hanno dato il loro prezioso contributo per la realizzazione di questa pubblicazione.

#### **Organizzazioni responsabili**

- SIA Società svizzera degli ingegneri e architetti
- ATS Associazione tecnica svizzera
- VSS Unione dei professionisti svizzeri della strada

ISBN 3-905234-52-1

Edizione originale: ISBN 3-905234-14-9

Copyright © Ufficio federale dei problemi congiunturali 3003 Berna, gennaio 1992.

La riproduzione di estratti è autorizzata con citazione della fonte.

Distribuzione Ufficio federale degli stampati e del materiale, Berna  
(N° di ordinazione 724.455 i)

Form. 724.455 i 1.95 500 U22586

# Introduzione

Il programma d'azione «costruzione ed energia» ha una durata di sei anni (1990-1995) ed è articolato nei tre programmi d'impulso (PI) seguenti:

- PI EDIL - manutenzione e rinnovamento
- RAVEL - uso razionale dell'elettricità
- PACER - energie rinnovabili

I programmi d'impulso, eseguiti in stretta collaborazione con l'economia, le scuole e la Confederazione, intendono promuovere una crescita economica orientata verso una maggiore qualità cioè una produzione di materie prime e di energia che tenga conto degli aspetti ambientali stimolando contemporaneamente le capacità creative.

Le premesse per il mantenimento di parti importanti delle nostre strutture insediative devono essere migliorate. Costruzioni edili ed opere di infrastruttura denotano carenze tecniche e funzionali sempre maggiori a causa dell'invecchiamento e dei continui cambiamenti delle nostre necessità ed esigenze. Per poter mantenere il loro valore d'uso le stesse devono essere rinnovate. Questo compito non può essere svolto in modo razionale attraverso continui «rappezzi dell'edificio». Accanto agli aspetti tecnico-costruttivi ed organizzativi sono trattati, nell'ambito del PI EDIL, anche le condizioni giuridiche quadro, riferite quasi esclusivamente alle nuove costruzioni. Questo programma è raggruppato in tre settori: opere di sovrastruttura, sottostruttura e settori affini.

Le molteplici lacune esistenti in questi settori da parte dei proprietari interessati, Enti pubblici, progettisti, imprenditori e lavoratori di tutti i livelli devono essere colmate.

Solo in questo modo è possibile mantenere e migliorare sia l'importanza funzionale, economica e culturale di molti quartieri, villaggi e città sia la qualità tecnica ed architettonica dei nostri edifici.

## **Corsi, giornate di studio, pubblicazioni, video, ecc.**

Gli obiettivi del PI EDIL devono essere realizzati mediante la formazione ed il perfezionamento, sia da parte di specialisti ed utenti dei servizi che si occupano di rinnovamenti, che attraverso l'informazione.

La diffusione delle conoscenze è finalizzata all'applicazione pratica di tutti i giorni. La stessa fa capo principalmente a pubblicazioni, corsi e giornate di studio.

Gli interessati possono ottenere le informazioni dettagliate nella rivista IMPULSO in cui la vasta offerta in possibilità di perfezionamento è suddivisa per rami professionali e categorie di destinatari.

Questo periodico è pubblicato due/tre volte all'anno ed è ottenibile gratuitamente (in abbonamento) presso l'Ufficio Federale dei problemi congiunturali, 3003 Berna. La pubblicazione è inoltre ottenibile presso l'Ufficio Federale degli stampati e del materiale (UFSM), 3003 Berna.

Ogni partecipante al corso potrà ottenere la relativa documentazione. La stessa consiste principalmente in una pubblicazione specialistica elaborata esclusivamente per questa occasione. Queste pubblicazioni possono essere ordinate anche presso l'Ufficio Federale degli stampati e del materiale (UFSM), 3003 Berna.

## **Competenze**

Per poter far fronte all'ambizioso programma di formazione è stato scelto un concetto di realizzazione elaborato da parte di specialisti competenti che nello stesso tempo tenga conto di svariati settori in cui sono necessario conoscere l'interdisciplinarietà sulla conservazione ed il rinnovamento delle costruzioni, ed abbia il necessario sostegno dalle associazioni e scuole operanti nel ramo. Una commissione composta da rappresentanti di associazioni, scuole ed organizzazioni determina il contenuto del programma ed assicura la coordinazione con le altre attività nel settore dei rinnovamenti edilizi. Le organizzazioni del settore si incaricano della realizzazione dell'offerta in formazione ed informazione. La responsabilità dell'elaborazione è affidata al team della direzione del progetto (Reto Lang, Andreas Bouvard, Andreas Schmid, Richard Schubiger, Ernst Meier, Dr. Dieter Schmid, Rolf Sägeser, Hannes Wüest e Eric Mosimann, BFK).

Il lavoro principale viene svolto da gruppi di lavoro che devono trovare delle soluzioni a compiti singoli definiti sia in riferimento alla scadenza che ai costi.

## **Documentazione**

La presente documentazione tratta l'argomento dei sistemi di protezione nelle opere di infrastruttura e nelle costruzioni civili soprattutto dal punto di vista del mantenimento e del rinnovamento degli stessi. I sistemi di protezione relativi ai diversi materiali ed alle modalità di costruzione sono trattati nell'ambito di considerazioni complessive. Ne fanno parte costruzioni in calcestruzzo, acciaio, legno e pietre naturali.

Tutti questi materiali da costruzione possono essere danneggiati o invecchiare a causa di influssi sia esterni che interni. I sistemi di protezione vengono utilizzati per proteggere ulteriormente il materiale e le parti delle costruzioni in cui le caratteristiche di protezione naturale del materiale da costruzione non sono sufficienti per garantire la durata e l'idoneità d'uso richieste. La documentazione contiene delle indicazioni sui vari sistemi di protezione, sui meccanismi di invecchiamento e danneggiamento, sul controllo ed il mantenimento come anche sulla manutenzione ed il rinnovamento dei sistemi di protezione.

Purtroppo nella progettazione e nella prassi si è potuto constatare la forte diversità dei singoli metodi di costruzione. Il gruppo di lavoro ha quindi preso atto con piacere che in questo ambito gli esperti dei vari settori hanno collaborato costruttivamente.

Con ciò si è potuto evidenziare che la problematica del mantenimento non presenta delle grandi differenze e che delle esperienze importanti fatte in un determinato settore possono essere applicabili anche ad un altro. Si sono inoltre manifestate delle importanti lacune nelle conoscenze riguardanti in particolare le questioni sul comportamento effettivo e sulla durata dei sistemi di protezione. Sarebbe di grande utilità per la pratica se

in un prossimo futuro questa tematica fosse approfondita in modo opportuno da parte di enti competenti. Ciò potrebbe rivestire un'importanza anche dal punto di vista socio-economico.

La presente documentazione è stata perfezionata e completata in modo accurato a seguito di una procedura di consultazione e di un test-dimostrativo effettuato nell'ambito di una giornata di prova. Gli autori hanno comunque potuto esprimersi liberamente giudicando e prendendo in considerazione, secondo valutazioni personali, le differenti opinioni su singole questioni. Gli stessi sono quindi responsabili dell'elaborazione del testo. I problemi che dovessero sorgere nell'applicazione pratica, potranno essere eliminati con un'eventuale rielaborazione. Eventuali indicazioni o stimoli possono essere inviati e sottoposti all'Ufficio federale dei problemi congiunturali od al responsabile della redazione/direttore dei corsi (confr. pag. 2).

Un ringraziamento particolare va ai collaboratori che hanno contribuito in maniera determinante alla buona riuscita di questa pubblicazione.

Prof. Dott. B. Hotz-Hart  
Vicedirettore dell'Ufficio federale  
dei problemi congiunturali

# Indice

---

<b>1.</b>	<b>Introduzione</b>	<b>7</b>
1.1	In generale	8
1.2	Obiettivi della documentazione	8
1.3	Destinatari	10
1.4	Spiegazione della tematica	11

---

<b>2.</b>	<b>Condizioni di base</b>	<b>19</b>
2.1	Il quadro normativo	20
2.2	Direttive ed disposizioni legali	23
2.3	Effetti e meccanismi di invecchiamento e danneggiamento	25
2.4	Garanzia di qualità	27
2.5	Compatibilità ambientale	28
2.6	Edifici meritevoli di tutela	29

---

<b>3.</b>	<b>Esigenze poste ai sistemi di protezione e principi di scelta</b>	<b>31</b>
3.1	In generale	32
3.2	Esigenze generali poste ai sistemi di protezione	33
3.3	Riflessioni specifiche sulle costruzioni ed il relativo materiale in base ad un esempio	36

---

<b>4.</b>	<b>Costruzioni in calcestruzzo</b>	<b>45</b>
4.1	In generale	46
4.2	Struttura dei sistemi di protezione	47
4.3	Meccanismi di invecchiamento e danneggiamento	51
4.4	Riparazione del calcestruzzo e delle armature	54
4.5	Sistemi di impermeabilizzazione	80

---

<b>5.</b>	<b>Costruzioni in acciaio</b>	<b>101</b>
5.1	In generale	102
5.2	Meccanismi di invecchiamento e danneggiamento	105
5.3	Tipi di sistemi di protezione contro la corrosione	109
5.4	Controllo e manutenzione	114
5.5.	Rinnovamento	114

---

<b>6.</b>	<b>Costruzioni in legno</b>	<b>117</b>
6.1	In generale	118
6.2	Meccanismi di invecchiamento e danneggiamento	119
6.3	Elementi costruttivi	123
6.4	Misure di protezione ed effetti	126
6.5	Controllo, manutenzione e rinnovamento	131

---

---

<b>7.</b>	<b>Muratura in pietra naturale</b>	<b>133</b>
7.1	In generale	134
7.2	Tipi di pietre naturali e murature	135
7.3	Meccanismi di invecchiamento e danneggiamento	141
7.4	Controllo	144
7.5	Manutenzione e rinnovamento	145

---

<b>8.</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>151</b>
-----------	---------------------	------------

---

<b>9.</b>	<b>Allegato</b>	<b>161</b>
9.1	Indice delle abbreviazioni	162
9.2	Documentazione illustrata	163

---

	<b>Pubblicazioni del programma d'impulso PI EDIL</b>	<b>165</b>
--	--	------------

---

# 1. Introduzione

---

<b>1.1</b>	<b>In generale</b>	<b>8</b>
<b>1.2</b>	<b>Obiettivi della documentazione</b>	<b>8</b>
<b>1.3</b>	<b>Destinatari</b>	<b>10</b>
<b>1.4</b>	<b>Spiegazione della tematica</b>	<b>11</b>

---

# 1. Introduzione

## 1.1 In generale

L'importanza della conservazione delle costruzioni cresce di anno in anno. In base a stime conosciute il valore degli investimenti per la manutenzione delle opere di infrastruttura e civili ammonta in Svizzera a ca. 300.- / 400.- miliardi di franchi. Questo grande patrimonio nazionale deve essere mantenuto. Il nostro parco edilizio entra progressivamente in una fase di rinnovamento. Ciò è da addebitare, tra l'altro, alle necessarie modifiche di carattere funzionale e di sicurezza. Se si tiene conto di una durata di vita delle opere di infrastruttura e civili di 50-100 anni bisognerebbe investire annulamente da 4 a 8 miliardi di franchi per provvedimenti di manutenzione e di rinnovamento. Nel settore pubblico vengono attualmente investiti soltanto ca. 2,5 miliardi di franchi.

**Il programma d'impulso «mantenimento e rinnovamento edilizio» ha come obiettivo di contribuire alla diffusione delle conoscenze in questo settore. Si tratta soprattutto di utilizzare le conoscenze esistenti sia all'estero che in Svizzera rielaborate secondo aree tematiche opportune mettendole poi a disposizione per l'uso pratico.**

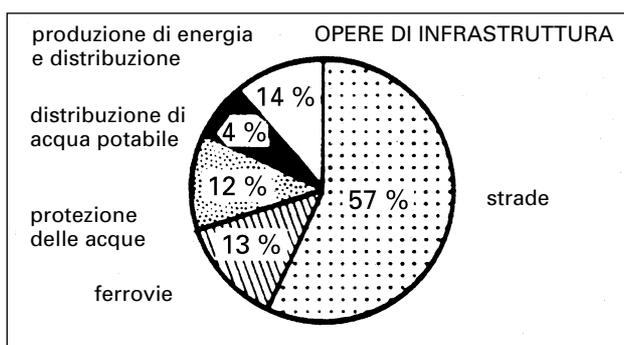


Figura 1.1 Ripartizione percentuale secondo il valore dei settori più importanti dell'edilizia nelle opere di infrastruttura e costruzioni civili (fonte: Ufficio Federale di statistica).

## 1.2 Obiettivi della documentazione

In questa documentazione le conoscenze acquisite nel settore dei sistemi di protezione delle opere di infrastruttura e costruzioni civili viene esteso, per la prima volta, anche al **materiale ed al tipo di costruzione**. Di regola, il contenuto si riferisce alla riparazione ed al rinnovamento dei sistemi di protezione nelle costruzioni **esistenti**. Sono inoltre contemplate le indicazioni sul modo di utilizzare le esperienze fatte nell'ambito della progettazione di nuove opere. In tal modo dovrebbe essere possibile evitare che soluzioni, spesso costose e non adeguate, vengano nuovamente utilizzate provocando gli stessi problemi con i quali si è attualmente confrontati.

Intendiamo quindi dimostrare come sia possibile proteggere le strutture portanti esistenti e nuove e come si deve procedere nella progettazione e nell'esecuzione. In questo ambito il concetto di **progettazione** ha un'importanza determinante. Dobbiamo cercare di abbandonare la solita prassi del «rappezzamento» e dalla politica «dei cerrotti». La protezione di una costruzione esistente o nuova contro gli influssi ambientali è **un compito molto importante ed ambizioso per gli ingegneri e progettisti**.

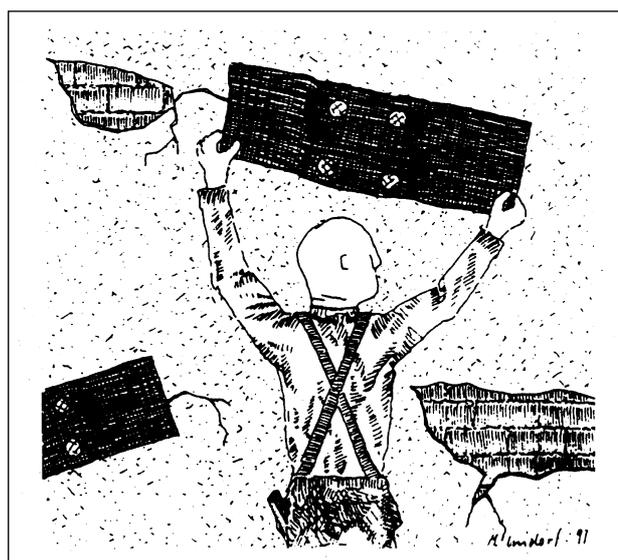


Figura 1.2 Il rinnovamento, rispettivamente il mantenimento è molto di più di un semplice rappezzo.

L'approfondimento dei problemi deve avvenire già nel corso della progettazione. Soprattutto **nell'elaborazione del piano d'utilizzazione** i problemi devono essere individuati e gli obiettivi di protezione definiti in modo adeguato.

Le riflessioni devono portare all'individualizzazione di esigenze ben definite di qualità poste nei confronti dei prodotti e delle procedure per poi essere introdotte, con un grado di dettaglio sufficiente, **nel bando** dei lavori. Non si tratta quindi di scegliere ed esaminare determinati prodotti o procedure che offre il mercato. Si tratta invece di individuare le necessarie condizioni quadro per la loro scelta ed il controllo.

Le ditte esecutrici ed i fornitori dei prodotti dispongono quindi ancora della loro libertà imprenditoriale e possono decidere come raggiungere gli obiettivi prefissati. Ciò va comunque fatto nel rispetto delle **esigenze di qualità** da definire nel bando dei lavori. Per allestire un'offerta valida le imprese devono conoscere tutte le **esigenze riguardanti i costi e le scadenze incluso il relativo controllo della qualità dell'opera**. Soltanto in questo modo è possibile evitare spiacevoli sorpassi di costi e ritardi nelle scadenze. Non solo nella progettazione di nuovi edifici ma anche e soprattutto nella progettazione per il mantenimento di un edificio esistente l'ingegnere incaricato è chiamato a svolgere un lavoro altamente qualificato.

Nei tipi di costruzione trattati in questa sede l'ingegnere progettista ha solitamente a che fare con un **committente esperto o con il suo rappresentante**. Nella determinazione di obiettivi qualitativi, il ruolo di quest'ultimo è essenziale per un fruttuoso dialogo tra progettista e committente. La documentazione deve contribuire alla messa a fuoco dei diversi punti di vista citati e dare delle indicazioni sugli obiettivi della protezione nonché le esigenze riguardanti i materiali e l'esecuzione. La stessa si fonda su documenti già pubblicati dal gruppo di lavoro «aiuto per la progettazione di strade di grande capacità» e «metodi diagnostici»:

- manutenzione delle strade in esercizio a traffico intenso No. 724.452 [1.1.]
- tecniche di indagine nelle costruzioni di sottostuttura e del genio civile No. 724.453 [1.2.]

Quale base per la progettazione di provvedimenti di protezione nelle costruzioni esistenti è necessaria la presentazione di una **valutazione esauriente sulle condizioni**. Basandosi su questo documento e quindi possibile **progettare i provvedimenti per la riparazione ed il rinnovamento** ( figura 1.3.).

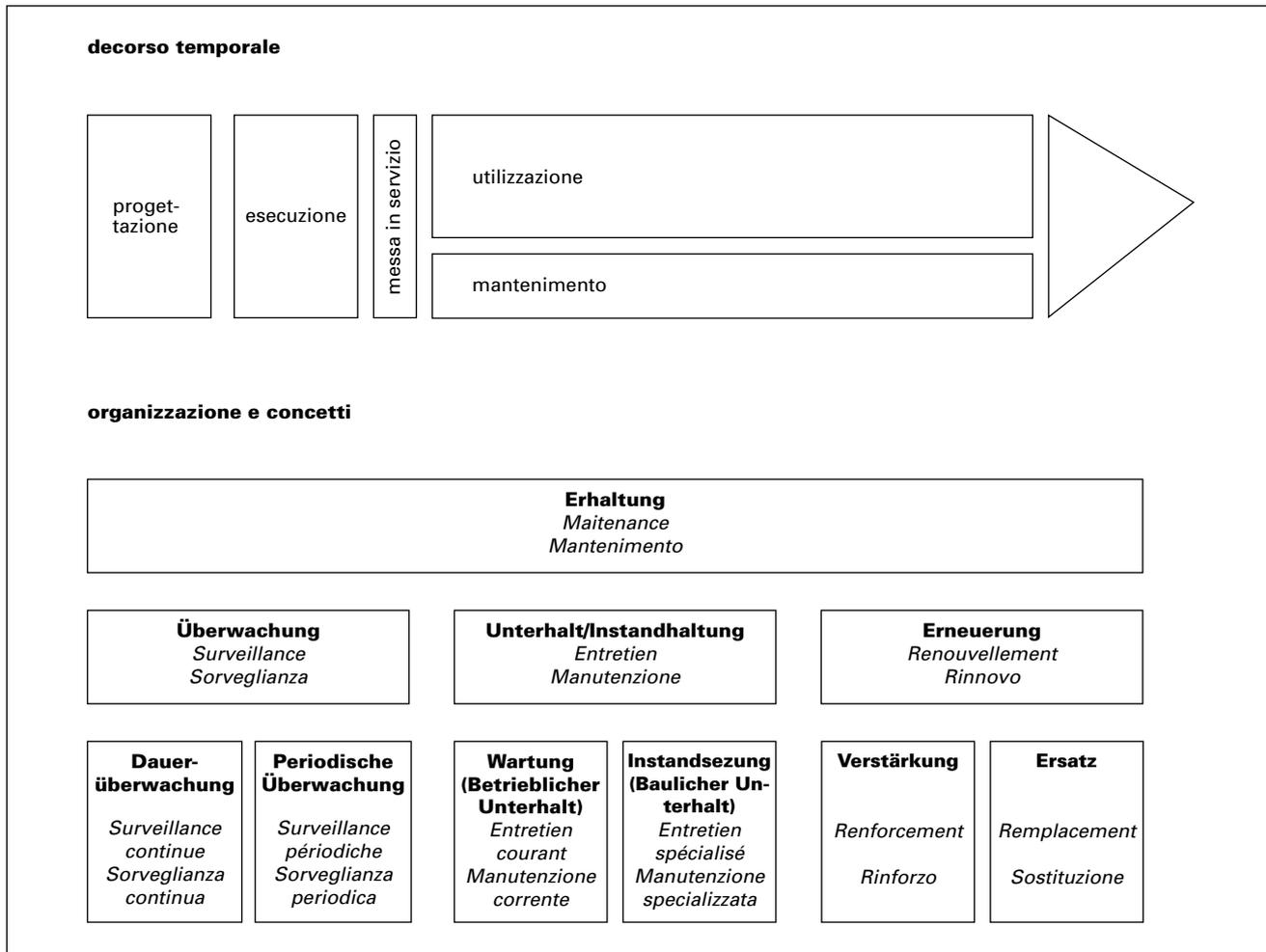


Figura 1.3 I concetti secondo la raccomandazione SIA 169 (1987), mantenimento di costruzioni civili.

### 1.3 Destinatari

**La documentazione è rivolta soprattutto agli ingegneri progettisti ed ai direttori dei lavori.** Queste persone possono essere attive negli studi d'ingegneria, nelle imprese e nell'amministrazione pubblica. Il destinatario di questa documentazione non è uno specialista esperto ma un ingegnere che si vede confrontato, giorno per giorno, con problemi di svariata natura relativi alle opere di infrastruttura e civili, che devono essere risolti a breve termine. Questa documentazione gli permetterà l'accesso ai vari settori della tematica trattata. Un'applicazione autonoma delle conoscenze

acquisite dovrebbe essere possibile attraverso un impegno attivo soprattutto mediante lo studio della letteratura specializzata citata. L'ingegnere progettista deve essere messo nella condizione di poter progettare i provvedimenti di mantenimento e di rinnovamento e di essere in grado di concepire le nuove costruzioni conformi alle esigenze del mantenimento.

Il direttore dei lavori deve ricevere le indicazioni sui punti salienti dell'esecuzione dei sistemi di protezione. I diversi metodi sono trattati secondo l'im-

portanza assegnata agli stessi dal punto di vista del progettista e del direttore dei lavori. Non si tratta quindi di insegnare ai costruttori edili i metodi di risanamento o di aggiornare o perfezionare degli specialisti.

#### Linguaggio nell'edilizia

L'autore è a conoscenza del fatto che nel gruppo dei destinatari a cui è rivolta la presente pubblicazione, ci sono anche delle donne.

Dal punto di vista linguistico bisognerebbe rivolgersi alle stesse in modo idoneo. Il linguaggio edilizio è a tutt'oggi fortemente maschilista ed i riferimenti femminili mancano.

Gli autori non essendo «coniatori di parole» il linguaggio utilizzato risulta ancora di tipo tradizionale. La presente pubblicazione si rivolge comunque anche alle donne.

## 1.4 Spiegazione della tematica

Le nostre opere esistenti sono esposte a molteplici influssi. Gli stessi possono pregiudicare in svariati modi la durata e quindi il valore delle costruzioni.

Possiamo inoltre notare che l'effetto degli influssi si è rafforzato. Ciò è visibile, ad es., in noti edifici storici i quali hanno superato relativamente bene molti secoli per poi subire dei grossi danni in epoche recenti (1.3.). Molte di queste opere sono costruite in pietra naturale ed il loro danneggiamento è dovuto, oltre che all'invecchiamento naturale, agli elementi aggressivi contenuti nell'aria e nell'acqua piovana. Si può notare che sono soprattutto la superficie che subisce dei cambiamenti e poco a poco la pietra e quindi tutto l'insieme della costruzione perde il carattere originale.

Ma anche le opere costruite in tempi più recenti presentano dei danni sulla superficie dopo un periodo di utilizzazione relativamente breve.

Soprattutto per i beni culturali di inestimabile valore ma anche per le molteplici opere moderne di infrastruttura e civili colpite, è importante trovare provvedimenti di protezione. I nostri sforzi devono comprendere anche le strategie atte al mantenimento delle condizioni. In casi singoli si è potuto arrivare ad una diminuzione degli agenti inquinanti (ad es. riduzione della parte di SO<sub>2</sub> nell'aria). Nel contesto della presente documentazione si intende soprattutto dimostrare come sia possibile proteggere le costruzioni per garantire la loro durata nel tempo.

Si è inoltre posta la domanda quali **materiali da costruzione** devono essere esaminati. Per contrastare la sempre maggiore **segmentazione delle conoscenze ed esperienze** in ambiti ristretti, questa documentazione non si occupa soltanto della costruzione in calcestruzzo che è predominante, ma anche delle costruzioni in **acciaio, legno ed opere in muratura di pietra naturale**. Tutti questi materiali da costruzione hanno come caratteristica un determinato grado di auto-protezione o sono in grado di evitare la penetrazione di liquidi. Nei confronti di singoli influssi esiste quindi una capacità specifica di **auto-protezione del materiale da costruzione**.

Un contenitore in calcestruzzo può essere a tenuta stagna; ma lo stesso contenitore non è impermeabile nei confronti dell'olio da riscaldamento o diesel senza un sistema supplementare di protezione. Si può quindi parlare di **auto-protezione**

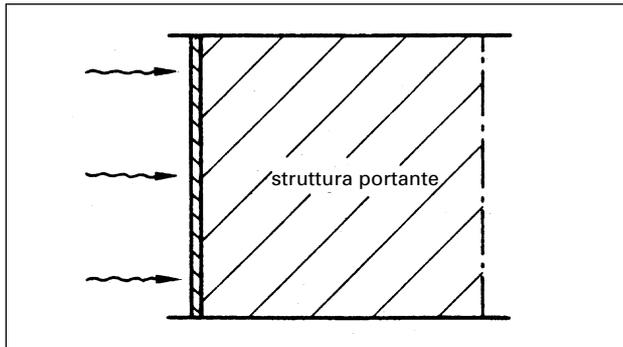


Figura 1.4 Evitare la penetrazione di elementi dannosi mediante sistemi di protezione idonei; questi devono essere previsti quando la facoltà di auto-protezione del materiale è insufficiente.

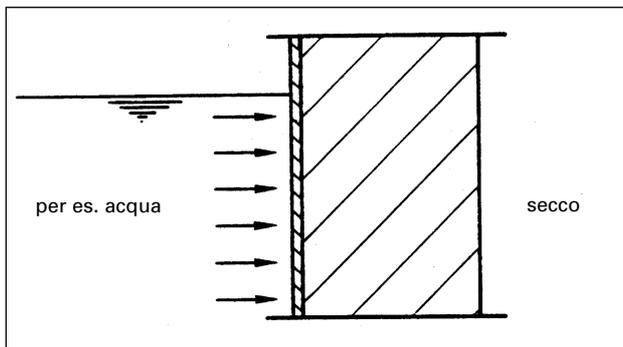


Figura 1.5 Evitare l'infiltrazione di liquidi mediante sistemi di protezione idonei; questi devono essere previsti quando la facoltà di auto-protezione del materiale è insufficiente.

**del materiale e dei tipi di costruzione e di sistemi di protezione supplementari.**

Esistono, tra l'altro, i seguenti sistemi di protezione supplementari (figure 1.4 e 1.5):

- **protezione della superficie** ( verniciature, rivestimenti, coperture, impregnazioni, armature, ecc).
- **impermeabilizzazioni** ( teli di impermeabilizzazione, film liquidi ecc.
- **procedura elettro-chimica** (protezione catodica contro la corrosione, ecc.).

Per raggiungere l'obiettivo di una sufficiente durata nel tempo sono necessari, oltre ai sistemi di protezione citati, **provvedimenti costruttivi** adeguati così come la **sorveglianza** e la **manutenzione**.

### Quali tipi di costruzione rientrano nella categoria di opere di infrastruttura e costruzioni civili?

Le definizioni che seguono, largamente utilizzate, sono comprensive di molti tipi di costruzione. Le stesse si distinguono a secondo delle funzioni, dell'uso e degli influssi delle singole opere.

#### Opere di infrastruttura:

«a differenza di opere di sovrastruttura, si tratta di opere a livello del suolo, interrato o sottoterra (opere stradali, opere in terra, gallerie, ferrovie, opere idrauliche e canalizzazioni, ecc.)»

#### Costruzioni civili:

«settore parziale della tecnica delle costruzioni riguardante opere che, tra l'altro, sono caratterizzate dal punto di vista tecnico-costruttivo e statico (ponti, opere in acciaio e con ossatura in cemento armato, grattacieli, torri, edifici industriali, capannoni, impianti idroelettrici, dighe)».

Di seguito sono illustrate le opere che formeranno oggetto di approfondimento nei capitoli successivi. Vengono inoltre già presentate alcune indicazioni importanti sui singoli tipi di costruzione e sugli obiettivi di protezione.

Si osserva che alcune tematiche della presente documentazione sono indicative anche per il settore delle costruzioni civili. Ciò riguarda soprattutto l'impermeabilizzazione di tetti piani o la protezione di facciate in calcestruzzo, pietra naturale o legno.

**Bacini per acque sotterranee** (figure 1.6. e 1.7.) Di regola, si tratta di costruzioni recenti che hanno potuto essere realizzate grazie **all'esecuzione in cemento armato**.

A questo punto si può già indicare in breve una particolarità **del metodo costruttivo in cemento armato**. In linea generale per garantire un bacino impermeabile all'acqua si possono applicare **due principi**:

- vasche in calcestruzzo impermeabili all'acqua (spesso denominata «vasca bianca»), per le quali deve essere garantita una struttura monolitica. Ciò significa eliminare o ridurre il più

possibile le fughe permanenti che spesso determinano problemi di durata nel tempo.

- Vasche con un'impermeabilizzazione flessibile o rigida della superficie.

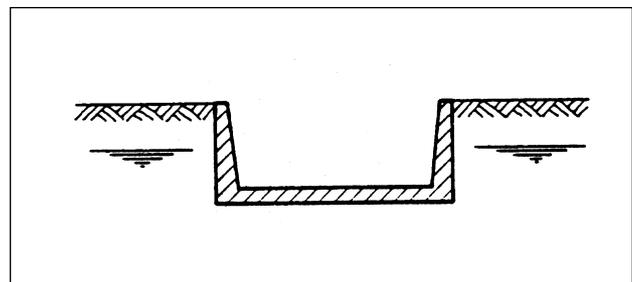


Figura 1.6 Sottopassaggio stradale o strada in sterro:  
 - protezione interna dell'armatura contro l'influsso del sale antigelo  
 - ermetizzazione della vasca contro le acque sotterranee (per evitare la formazione di ghiaccio sulle strade).

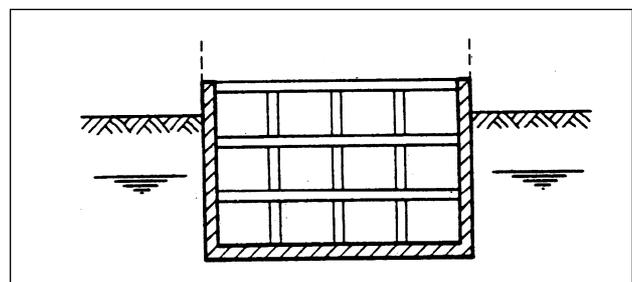


Figura 1.7 Piani scantinati nelle opere di sovrastruttura:  
 - ermetizzazione delle pareti esterne e della soletta in cemento armato (in aggiunta possono sussistere ulteriori esigenze per quanto riguarda l'umidità cioè, anche se l'infiltrazione di acqua non è visibile, è comunque possibile che ci sia troppa umidità per l'uso previsto)  
 - protezione del cemento armato o dell'acciaio delle superfici esterne contro i mezzi additivi aggressivi contenuti nell'acqua.

**Opere ricoperte di terra** (figura 1.8.)

In questo ambito si possono riprendere le osservazioni fatte per le vasche. Un importante differenza consiste nel fatto che nel caso in cui la protezione della soletta ricoperta di terra sia insufficiente od assente si possono verificare dei problemi di inadeguatezza alle esigenze d'uso ed **inavvertitamente, anche di stabilità e sicurezza**. Nelle solette piane usuali in cemento armato o cemento armato precompresso l'armatura superiore ha un compito decisivo, soprattutto riferito alla sicurezza contro un'eventuale perforazione. È pensabile che la mancanza di protezione dell'armatura possa portare ad una forte corrosione con conseguente perforazione locale della soletta e quindi ad un progressivo collasso con possibili conseguenze catastrofiche. Analoghe riflessioni possono essere fatte per le fondazioni soprattutto per quanto riguarda gli effetti dei mezzi aggressivi provenienti dal sottosuolo.

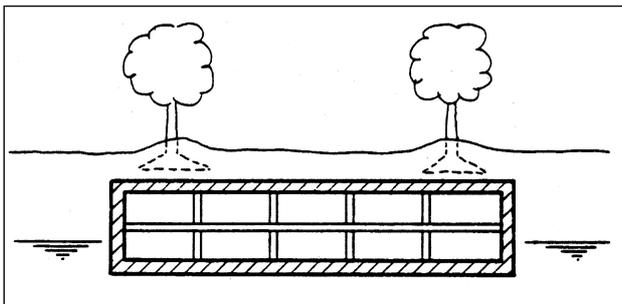


Figura 1.8 Autorimesse, stazioni ferroviarie sotterranee, ecc.:

- ermetizzazione delle pareti esterne e dei plinti di fondazione
- protezione del calcestruzzo e dell'armatura della soletta superiore
- protezione degli elementi costruttivi contro l'influsso del sale antigelo all'interno di autorimesse.

**Costruzioni di appoggio** (figure 1.9 e 1.10)

Per le costruzioni di appoggio solitamente vengono utilizzati sia il cemento armato, che la muratura in pietra naturale. All'estero è spesso usata anche la palancolata in acciaio.

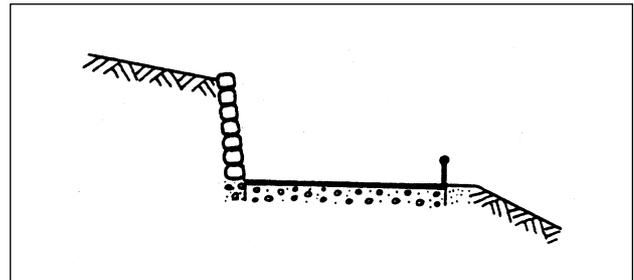


Figura 1.9 Muro di spalla tipico di muratura in pietra naturale:

- protezione della superficie delle pietre e del materiale dei giunti contro l'aggressività dell'aria, dell'acqua piovana e dei getti d'acqua contenenti sale antigelo.

Queste costruzioni di appoggio possono essere fissate mediante ancoraggi di fondazione e di roccia. I tiranti di queste ancore sono composti da acciature ad alta resistenza. Gli stessi sono molto sensibili alla corrosione causata dalla forte sollecitazione di trazione alla quale sono esposti e devono quindi essere adeguatamente protetti. Questa tematica vale anche per altri tiranti in acciaio come ad es. armature per cemento precompresso, funi e pali di sospensione e verrà trattata, prossimamente, nell'ambito del PI EDIL.

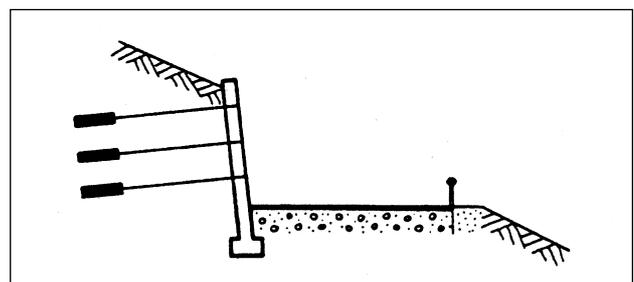


Figura 1.10 Muro di spalla in cemento armato con ancoraggio posteriore:

- protezione della parete contro l'aggressività dell'aria, dell'acqua piovana e contro i getti d'acqua contenenti il sale antigelo
- protezione degli ancoraggi permanenti e precompressi in roccia ed al suolo contro la corrosione del blocchetto in cemento e del tirante in acciaio in tutto il settore, cioè dalla calotta di protezione fino all'altra estremità. Vedi, tra l'altro [1.4].

### Gallerie di protezione (figure 1.11. e 1.12.)

Le stesse sono solitamente in cemento armato (tipi di costruzioni gettate in opera o prefabbricate). Per il tetto sono stati utilizzati anche elementi costruttivi in cemento armato precompresso. Alcuni tetti di gallerie sono inoltre costituiti da strutture composite.

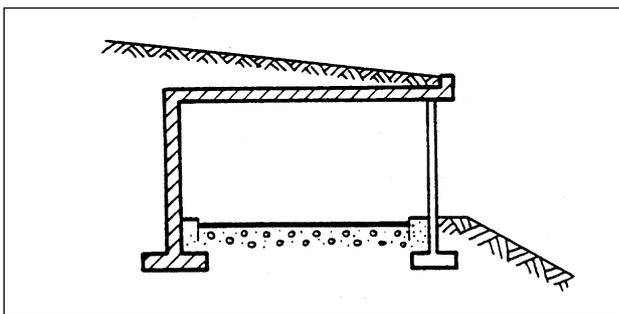


Figura 1.11 Gallerie con colonne di appoggio anteriori:  
 - ermetizzazione del tetto (impedire la formazione di ghiaccioli sul tetto ed il ghiaccio sulla carreggiata)  
 - protezione degli elementi di costruzione contro l'influsso del sale antigelo.

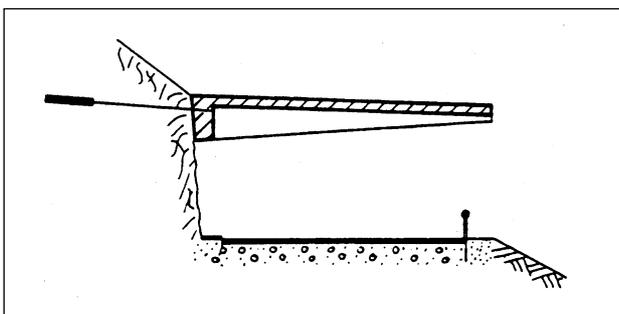


Figura 1.12 Galleria di protezione con sporgenza libera ed ancoraggio arretrato:  
 - ermetizzazione del tetto (impedire la formazione di ghiaccioli sul tetto ed il ghiaccio sulla carreggiata)  
 - per quanto concerne gli ancoraggi vedi le osservazioni sotto costruzioni d'appoggio.

### Ponti (figure 1.13. fino 1.16.)

In questo capitolo si ritrovano tutti i materiali da costruzione inclusi nella presente documentazione. Si tratta infatti di muratura in pietra naturale e legno per i ponti più vecchi ed in acciaio per le costruzioni ferroviarie dell'ultimo secolo. I ponti costruiti in questo secolo sono soprattutto in cemento armato e negli ultimi decenni anche in cemento armato precompresso. Negli ultimi anni si è potuto constatare un interesse accresciuto per i ponti in legno.

Gli stessi rappresentano inoltre un esempio di come sia possibile garantire una durezza in particolare mediante il concetto costruttivo, dove gli elementi della struttura portante sono protetti mediante la costruzione di un tetto.

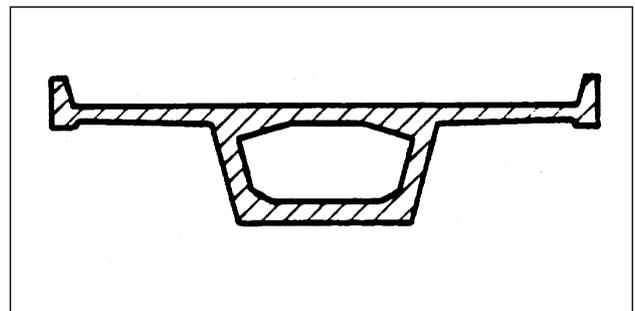


Figura 1.13 Tipico ponte in cemento armato precompresso per il traffico stradale e ferroviario:  
 - protezione contro il danneggiamento dovuto all'acqua ed al sale antigelo degli elementi costruttivi, quali le solette della carreggiata, i parapetti, le pile e le fondazioni, (queste ultime in caso di ponti sopra le strade).

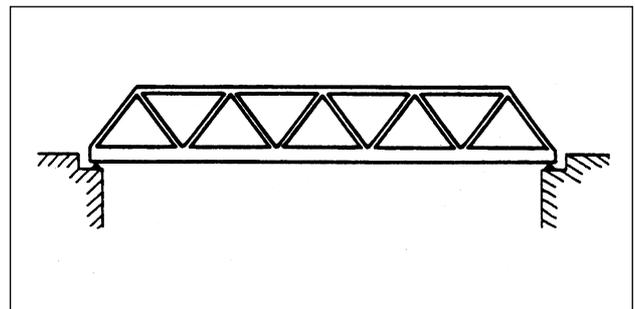
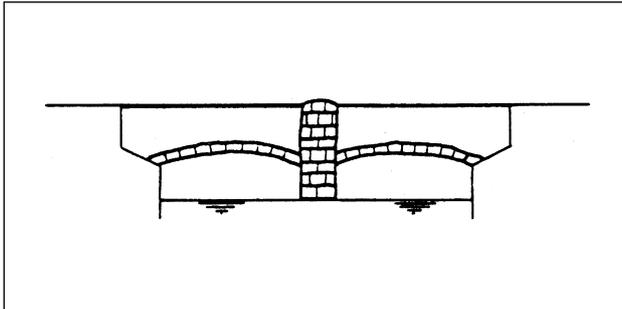
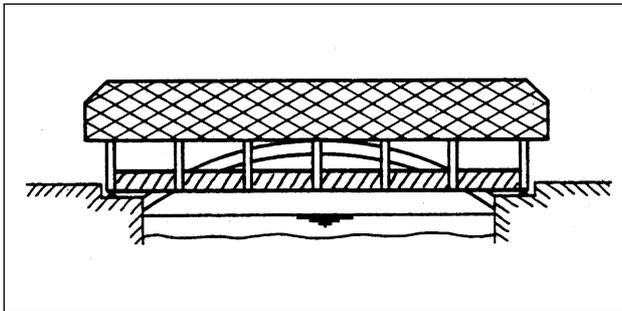


Figura 1.14 Ponte ferroviario in acciaio:  
 - protezione della costruzione in acciaio contro la corrosione.



**Figura 1.15** Ponte ad arco con muratura in pietra naturale:  
 - protezione della superficie delle pietre e del materiale per giunti contro l'aggressività dell'aria e dell'acqua piovana così come della carreggiata e dei parapetti contro il sale antigelo.

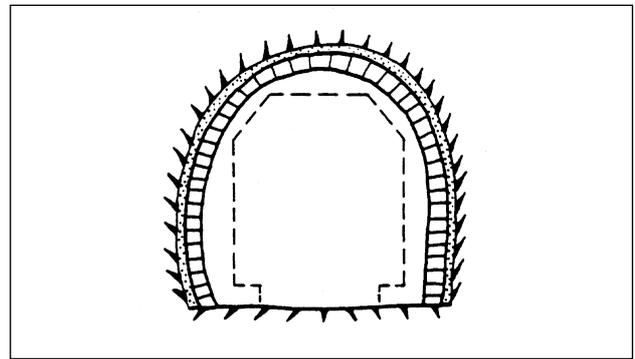


**Figura 1.16** Ponte in legno:  
 - protezione degli elementi portanti contro influssi che danneggiano il legno.

**Gallerie** (figure 1.17. e 1.19.)

Per la costruzione di gallerie, nell'ultimo secolo, soprattutto di quelle ferroviarie, si utilizzavano di regola murature in pietra naturale per il rivestimento.

Oltre alle tratte di gallerie ferroviarie realizzate in roccia l'attenzione va rivolta anche alle costruzioni dei portali che sono sovente ubicati in materiale sciolto.



**Figura 1.17** Galleria ferroviaria rivestita con muratura in pietra naturale:  
 - protezione delle pietre e del materiale per giunti contro i danni dovuti agli agenti atmosferici  
 - ermetizzazione del rivestimento; impedimento della formazione di ghiaccio nei giunti umidi nella zona del portale.

Nel corso della costruzione delle strade nazionali e nelle nuove tratte ferroviarie sono stati eseguiti dei rivestimenti ed altre installazioni come ad esempio delle solette di carreggiata in cemento armato. Parallelamente per le gallerie in sotterraneo è stato utilizzato sia il calcestruzzo gettato in opera che la prefabbricazione.

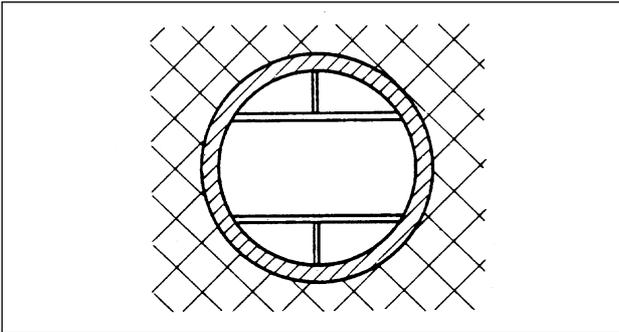


Figura 1.18 Gallerie in sotterraneo per il traffico stradale e ferroviario:

- protezione delle solette della carreggiata e delle altre superfici interne contro il sale antigelo (nelle gallerie stradali)
- protezione contro la corrosione delle sospensioni e dei fissaggi, non trattata, per ulteriori spiegazioni vedi [1.5]
- ermeticità del rivestimento in cemento armato (impedimento alla formazione di ghiaccio nei giunti e sulla carreggiata soprattutto nella zona del portale)
- protezione delle superfici esterne in cemento armato contro le acque che danneggiano il calcestruzzo o l'acciaio.

Le gallerie costruite in scavo a giorno vengono eseguite di regola in calcestruzzo gettato in opera.

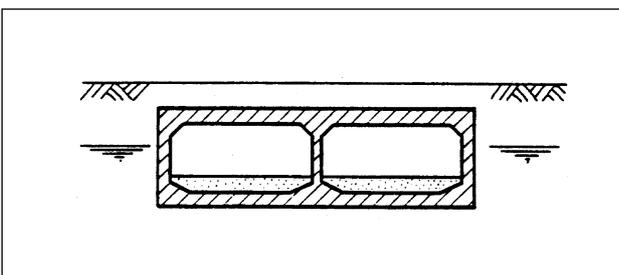


Figura 1.19 Gallerie costruite in scavo a giorno per il traffico stradale e ferroviario:

- protezione delle superfici interne contro il sale antigelo (per gallerie stradali)
- ermeticità della costruzione in cemento armato (impedimento alla formazione di ghiaccio nei giunti e sulla carreggiata)
- protezione delle superfici esterne in cemento armato contro le acque che danneggiano il calcestruzzo e l'acciaio.

### Contenitori di liquidi (figure 1.20 e 1.21)

Solitamente per l'accumulazione dell'acqua vengono utilizzati contenitori o bacini in cemento armato. Se i contenitori sono grandi si può anche usare il calcestruzzo precompresso, tenendo però presente che la precompressione anulare può essere eseguita sia con armatura per cemento precompresso sistemata all'interno delle pareti, sia mediante l'avvolgimento di fili metallici sull'esterno della parete. Nell'ultima procedura la protezione dell'acciaio precompresso deve essere garantita mediante un'applicazione accurata di uno strato di calcestruzzo a proiezione.

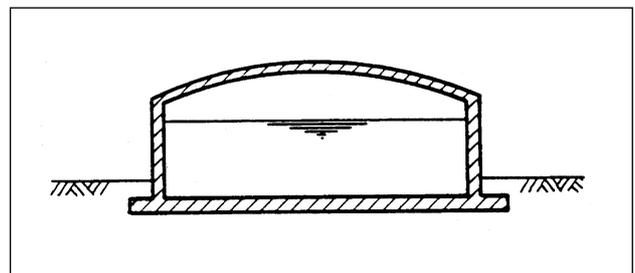
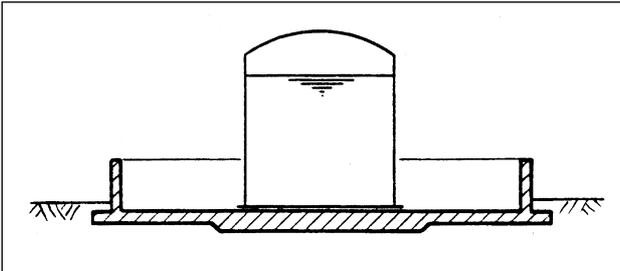


Figura 1.20 L'accumulazione di acqua (serbatoio di acqua, piscine).

- ermeticità del contenitore
- protezione delle superfici esterne ed interne contro le acque ed altri influssi che danneggiano il calcestruzzo e l'acciaio.

Per l'accumulazione di liquidi pericolosi sia per l'acqua che per l'aria vengono, di regola, utilizzati contenitori in acciaio, in cemento armato munito di un sistema di protezione ed, in casi particolari, anche in legno (con una precompressione anulare). Secondo disposizioni legali l'utilizzo di grandi contenitori impone l'istallazione di vasche di raccolta che in caso di cedimento del contenitore primario servono da barriera di sicurezza. Trattandosi di un settore speciale non possiamo occuparcene in questa documentazione. Per facilitare la comprensione nel cap. 2.2 sono segnalate le direttive e le ordinanze relative.



*Figura 1.21 Accumulazione di liquidi pericolosi per l'acqua e per l'aria (combustibili liquidi, prodotti chimici)*

- ermeticità del contenitore
- protezione delle pareti del contenitore e delle vasche di raccolta, da un lato contro gli influssi causati dal materiale di accumulo e dall'altro, contro gli influssi esterni.

**I seguenti campi d'applicazione di sistemi di protezione non vengono trattati nella presente documentazione:**

- condotte idriche, canalizzazioni per acque luride, gas, ecc.
- tiranti in acciaio per armature di cemento precompresso; ancoraggi al suolo ed in roccia, funi ed aste di sospensione
- sistemi di fissaggio e di sospensione in acciaio

PI EDIL tratterà queste tematiche nelle pubblicazioni e corsi che seguiranno.

## **2. Condizioni di base**

---

<b>2.1</b>	<b>Il quadro normativo</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Direttive e disposizioni legali</b>	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>Effetti e meccanismi di invecchiamento e danneggiamento</b>	<b>25</b>
<b>2.4</b>	<b>Garanzia di qualità</b>	<b>27</b>
<b>2.5</b>	<b>Compatibilità ambientale</b>	<b>28</b>
<b>2.6</b>	<b>Edifici meritevoli di tutela</b>	<b>29</b>

---

## 2. Condizioni di base

### 2.1 Il quadro normativo

Con la pubblicazione della nuova generazione di norme SIA per le strutture portanti disponiamo in Svizzera di norme moderne che corrispondono anche allo sviluppo ed alle esperienze fatte negli ultimi 10 -15 anni [2.1 - 2.6]. La raccomandazione SIA 169 si occupa soprattutto della conservazione di opere civili. Queste norme e raccomandazioni sono state presentate ai tecnici specializzati durante i corsi d'introduzione molto ben frequentati [2.7 - 2.10].

Accanto alla moltitudine di innovazioni, non preminenti per le problematiche trattate in questa documentazione, si richiama l'attenzione sull'introduzione dei cosiddetti **strumenti ordinatori**. Nell'ambito di valutazioni statistiche sulle cause che provocano i danni agli edifici si è potuto dimostrare chiaramente che lo **scambio di informazioni** tra coloro che sono coinvolti in un progetto, deve essere sensibilmente migliorato. Ciò è possibile mediante l'elaborazione di una documentazione specifica o attraverso piani come ad es.:

- il piano d'utilizzazione
- il piano di sicurezza
- il piano di verifica
- le indicazioni d'uso
- il piano di controllo
- il piano di manutenzione.

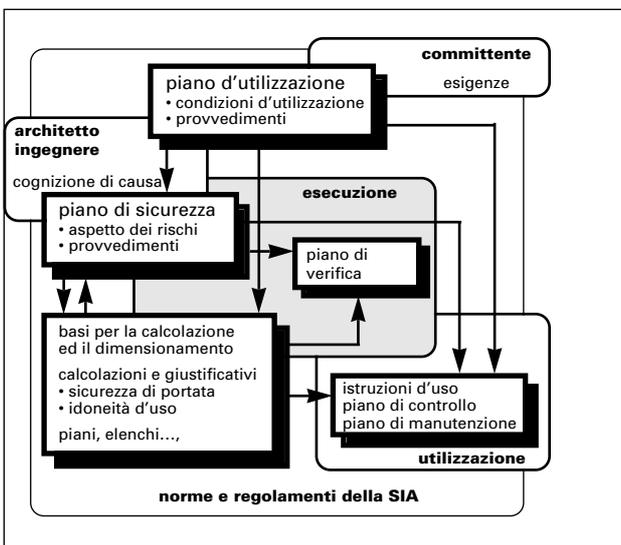


Figura 2.1 Rappresentazione schematica delle sequenze gerarchiche degli strumenti ordinatori [2.10].

Per le opere già realizzate purtroppo questi piani non sempre esistono o, se sono disponibili, gli stessi non sono strutturati nella forma desiderata. Questi piani devono quindi essere elaborati nell'ambito della progettazioni dei provvedimenti di mantenimento. Ciò dovrebbe garantire, tra i partecipanti, una discussione sulle questioni importanti. Nel piano d'utilizzazione devono essere indicati ad es.:

- la durata residua dell'utilizzazione
- l'utilizzazione convenuta
- le esigenze poste nei confronti dell'idoneità d'uso
- le condizioni d'uso introdotte
- i provvedimenti per garantire l'idoneità d'uso
- le possibilità di riparazione.

Nell'elaborazione di questi strumenti ordinatori deve essere prestata particolare attenzione alle esigenze riguardanti la **protezione degli edifici** esaminate in questa sede.

In particolare le indicazioni relative alle norme SIA e VSS che si occupano specificatamente dei sistemi di protezione, sono illustrate nei rispettivi capitoli della presente documentazione.

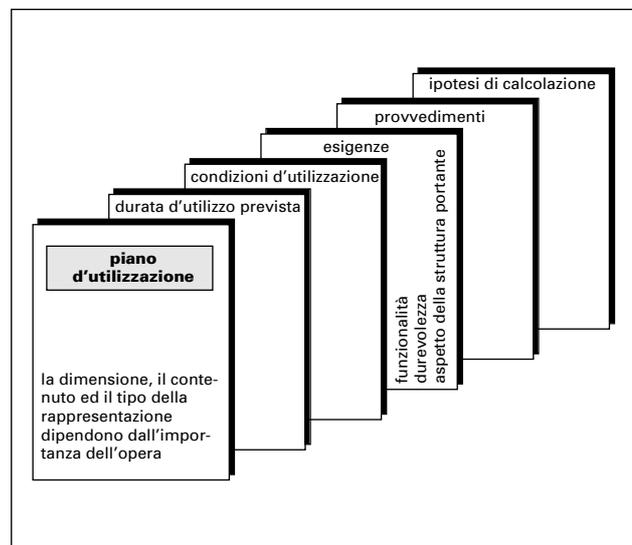


Figura 2.2 Rappresentazione schematica del contenuto di un piano d'utilizzazione [2.10].

Ci attendiamo inoltre che **l'armonizzazione tecnica** in Europa si estenda, col tempo, anche al nostro paese. In questo contesto è importante richiamare la **norma CE relativa ai materiali da costruzione CE - NMC 89/106 del 21.12.1988**.

La stessa stabilisce le esigenze generali poste nei confronti delle costruzioni ed il rispettivo materiale, come pure le regole per il libero trasporto delle merci nei paesi CE e, nel caso di adozione ed approvazione del contratto sulla SEE, l'estensione ai paesi dell'AELS. Le esigenze dettagliate saranno contenute nelle norme tecniche del comitato Europeo per la normalizzazione (CEN). La CEN è un'associazione di diritto privato dell'Istituto di Normalizzazione Svizzero dei 18 paesi della CE e AELS. L'Istituto di Normalizzazione Svizzero (SNV) rappresenta la Svizzera nel CEN ed è l'organizzazione superiore in materia di norme Svizzere. La SIA, all'interno del SNV, è responsabile per quanto riguarda l'ambito delle norme tecniche per l'edilizia e la VSS per quelle del settore stradale.

L'importanza delle direttive sul materiale da costruzione per la Svizzera è la seguente [2.17]:  
«La direttiva sul materiale da costruzione ha per svariati aspetti una grande importanza per la Svizzera.

**Da un lato** i committenti subordinati alle norme CE per incarichi del settore pubblico, devono tener conto delle caratteristiche tecniche elaborate nell'ambito delle norme sul materiale da costruzione (vedi ad es. art. 10 della norma sul coordinamento nel settore edilizio (89/440/CEE) e soprattutto art. 13 e 27 cpv. 3 della direttiva sui settori (90/531/CEE). In caso di accettazione da parte della Svizzera delle norme sulla fornitura le direttive inerenti i materiali da costruzione assumerebbero maggiore importanza. Ciò soprattutto perchè la non considerazione delle specificazioni tecniche europee negli atti del bando di concorso, potrebbe rappresentare un motivo per procedure ricorsuali. Tra parentesi va segnalato che per i progettisti, che nell'ambito dei bandi di concorso - CE sostengono e consigliano i committenti, rispettivamente elaborano personalmente la documentazione del bando di concorso, è molto importante conoscere sempre lo stato più recente delle norme europee. Un'inosservanza delle norme europee negli atti del bando di concorso può rappresentare una violazione dell'obbligo di diligenza e provocare un diritto al risarcimento dei danni da parte del committente.

**Dall'altro lato** va ricordato quanto segue: l'Istituto di Normalizzazione Svizzero (SNV) è membro

del CEN dove è già in corso un ampio lavoro sulla normalizzazione dei materiali da costruzione. Responsabile all'interno del SNV per le norme tecniche «nell'edilizia» è la SIA.

Visto l'impegno assunto da parte del SNV nei confronti del CEN, di sostituire la norma nazionale con quella europea (CEN) al momento della sua pubblicazione, le norme europee saranno introdotte, in futuro, nel catalogo delle norme edilizie nazionali. Si tratta quindi di una procedura indipendente dalla realizzazione di un trattato di Stato sul materiale da costruzione tra la Svizzera e la CE.

**D'altro canto** nel quadro delle negoziazioni SEE sono in corso degli sforzi per la conclusione di un accordo sui materiali da costruzione tra i paesi AELS e la CE.

Le condizioni quadro sono rappresentate dalle direttive CE sul materiale da costruzione, che verranno probabilmente riprese, senza modifiche sostanziali del contenuto, dai paesi AELS. **«L'accordo con la CE disciplinerà il libero trasporto di merci e dei materiali da costruzione in tutti i 18 paesi dell'Europa occidentale».**

Molti comitati tecnici con i rispettivi sottogruppi stanno elaborando, da diverso tempo, le norme CEN per tutti i settori dell'edilizia. Mentre l'elaborazione di alcune norme è conclusa, per altre bisognerà aspettare ancora alcuni anni prima che le stesse siano disponibili.

Anche nell'ambito dei **sistemi di protezione** e dei relativi **prodotti** è in corso l'elaborazione di norme. Anche in questo lavoro collaborano degli esperti svizzeri. L'obiettivo è la determinazione delle esigenze poste nei confronti di prodotti o gruppi di prodotti con le relative prove attitudinali e controlli di qualità. Le stesse rappresentano le condizioni per il raggiungimento del marchio CE di conformità, il cosiddetto «Marchio CE» (certificato europeo).

Il prodotto provvisto di questo marchio risponde alle esigenze poste e può essere utilizzato liberamente in tutti i paesi del mercato interno europeo.

Il marchio di conformità - CE è rappresentato dal simbolo



Devono inoltre essere indicati:

- le norme o le caratterizzazioni del produttore ed, eventualmente
- le indicazioni sulle caratteristiche del prodotto se del caso con specificazioni tecniche,
- le ultime due cifre dell'anno di fabbricazione,
- il simbolo dell'ente di controllo incaricato,
- il numero del certificato di conformità CE.

È probabile che in un prossimo futuro anche in Svizzera questo marchio per i materiali da costruzione possa assumere importanza e ciò indipendentemente dalle trattative della Svizzera con lo SEE o la CE .

## 2.2 Direttive e disposizioni legali

Vari committenti pubblici hanno elaborato delle direttive per le loro costruzioni che di regola, valgono per la progettazione e l'esecuzione di nuovi edifici. Molte disposizioni di queste direttive sono da tenere in considerazione anche nella progettazione dei provvedimenti di mantenimento.

Le decisioni principali per la scelta di sistemi di protezione vengono adottate in base a queste direttive.

Sia l'Ufficio federale delle costruzioni stradali (UCS) che le Ferrovie federali svizzere (FFS) richiedono l'impermeabilizzazione delle solette della carreggiata nella costruzione dei ponti.

In aggiunta alle direttive che seguono troverete ulteriori definizioni riguardanti la durata della protezione degli edifici in documenti meno ufficiali come ad es. condizioni di concorso, direttive interne e tecniche. L'UCS e le FFS, ad es. esigono una copertura minima in calcestruzzo dell'armatura di 40 mm.

Anche per organizzazioni di committenti privati più importanti esistono alcune direttive che riguardano le esigenze poste nei confronti dei sistemi di protezione.

### Elenco di direttive importanti

- Ufficio federale delle costruzioni stradali (UCS):
  - direttive sui dettagli costruttivi di ponti, Berna 1990
  - direttive sull'utilizzo di acciaiature in conglomerato di resina epossidica, Berna, 1991
  - direttive sulla progettazione di gallerie stradali, 1970.
- Ferrovie federali svizzere (FFS):
  - indicazioni W. edil GD 36/89 disposizioni generali, sezione trasversale normale e dettagli costruttivi per la progettazione di ponti in massicciata.
- Società svizzera di protezione contro la corrosione (SSC):
  - direttive sulla protezione contro la corrosione elettrolitica degli impianti a corrente continua, C3 d, edizione 1981, Zurigo
  - direttive sulla protezione contro la corrosione degli impianti metallici interrati di costruzioni o di altre installazioni con fondazioni armate o in terra, C2 d, edizione 1984, Zurigo (attualmente in rielaborazione).

Come già illustrato nel cap. 1.4 i **sistemi di protezione riferiti alle costruzioni per l'accumulo di materiale inquinante l'acqua e l'aria**, trattandosi di un campo specifico, non vengono ulteriormente trattati in questa documentazione. Per facilitare la comprensione, vengono elencate di seguito le **norme, direttive e disposizioni legali per la costruzione di serbatoi**. Per dare una visione globale l'elenco contiene inoltre una documentazione che non tratta direttamente la tematica dei sistemi di protezione.

**Norme, direttive e disposizioni legali sulla costruzione di serbatoi ed elementi di questi impianti:**

- Direttive sui serbatoi, CARBURA, Zurigo.
- Legge federale contro l'inquinamento delle acque (LIA) ed in particolare ordinanza contro l'inquinamento delle acque con liquidi nocivi (OIA)
  - Direttive tecniche sulla protezione delle acque dall'inquinamento di idrocarburi e altri liquidi nocivi (TTV)
  - Legge federale sulla protezione dell'ambiente (LPA) ed in particolare: Ordinanza sulla prevenzione di incidenti e malattie professionali (OPI).
- Direttive per la protezione contro gli effetti nocivi della corrente elettrica nei depositi di carburante autonomi ed in tutti quelli con raccordo ferroviario (WeT); Ispettorato federale sulla corrente forte (IFCF).
- Norme sulla protezione contro gli incendi VKF (titolo prov.)
- Direttive INSAI , fogli d'istruzione, pubblicazioni ed in particolare:
  - Form. 1825 «Direttive sull'immagazzinamento ed il travaso di liquidi infiammabili con un punto di infiammabilità inferiore a 55° C»
  - Form. 2153 «Basi sulla protezione contro l'esplosione con una raccolta di esempi ex-zone

- Form. 1469 «Caratteristiche di sicurezza tecnica dei liquidi e gas»
- Form. 1903 «Valori limite dell'igiene del lavoro»
- Form. 4406 Foglio d'istruzione «parapetti»

- Norme SIA e specialmente le norme N. 160, 161, 162 e 183

Raccomandazioni

- Ordinanza 3 della legge federale sul lavoro (O3-LLav)
- Direttive per la costruzione di serbatoi verticali prismatici, SVDB Zurigo
- Direttive per il dimensionamento, l'esecuzione ed il controllo di serbatoi cilindrici con pavimentazione ad arco SVDB, Zurigo
- Direttive per la calcolazione, l'esecuzione ed il controllo di serbatoi verticali, cilindrici autonomi con pavimentazione piana (serbatoi verticali) e bacini di raccolta in acciaio, SVDB, Zurigo

(stesura attuale)

## 2.3 Effetti e meccanismi di invecchiamento e danneggiamento

Per determinare le esigenze poste nei confronti della protezione di costruzioni è necessario conoscere da che cosa le stesse devono essere protette e quali sono i meccanismi che conducono all'invecchiamento ed al danneggiamento.

Le costruzioni sono esposte, a seconda del loro **utilizzo** ed **esposizione**, ai più svariati **influssi**. Gli stessi possono essere suddivisi in **influssi naturali** ed **antropogeni, cioè causati dall'uomo**. Il concetto **invecchiamento** può essere attribuito agli **influssi naturali** ed il concetto di **danneggiamento** a quelli **antropogeni**.

Di regola sia l'invecchiamento che il danneggiamento avvengono tramite influssi che agiscono dall'**esterno** sulla superficie della costruzione.

A seconda dei casi gli influssi esterni possono essere:

- carichi statici e dinamici:  
carichi stradali, carichi derivanti dalle fondazioni, pressione dell'acqua, vento, scosse, neve, valanghe ecc.
- Influssi meccanici:  
abrasione, danneggiamenti meccanici, ecc.
- Influssi climatici:  
sbalzi di temperatura, radiazione UV, umidità sotto forma di pioggia, nebbia, rugiada, ecc.
- Influssi chimici:  
sale antigelo, acque solfatiche, piogge acide, gas (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>), liquidi inquinanti l'acqua e l'aria, ecc. Esistono inoltre influssi elettrochimici causati da correnti vaganti.
- Influssi biologici:  
crescita delle piante, formazione di funghi, microorganismi, ecc.

Alcuni influssi producono stati di tensione e di dilatazione delle strutture portanti che possono influire ulteriormente sul comportamento delle superfici della costruzione.

I processi di invecchiamento e di danneggiamento non si formano soltanto a causa degli influssi esterni, ma possono essere prodotti anche da processi **all'interno**. Tra questi ultimi si possono segnalare ad es., la combinazione di due materiali incompatibili tra di loro, l'uso di materiali instabili e le ripercussioni causate dall'umidità specifica esistente nel materiale.

Nella prassi sovente possiamo riscontrare anche dei danni causati dalla **combinazione di processi esterni ed interni**.

Accanto agli influssi naturali, le cui ripercussioni possono essere denominate anche con il concetto di **degrado causato da agenti atmosferici**, nel corso della storia sono aumentati i carichi antropogeni causati dall'uomo. Ciò riguarda, ad es., **l'inquinamento dell'aria** dovuto alle attività dell'uomo. Non si tratta di un fenomeno recente. Già nel 1240 Federico II emanò un editto sulla pulizia dell'aria, delle acque e del suolo. Alcuni decenni più tardi l'Inghilterra emanò una legge contro l'utilizzo del carbone fossile [2.11]. È noto che già nel Medioevo oltre al degrado naturale, l'inquinamento dell'aria influiva sulle costruzioni in pietra naturale. In Inghilterra, nel 18esimo secolo, venne riconosciuta chiaramente la connessione tra lo zolfo derivante dalla combustione del carbone ed i danni ai materiali da costruzione come ferro e pietre [2.12]. Nella figura 2.3. viene illustrato lo sviluppo del valore pH dell'acqua piovana in Svizzera. Il decorso del diagramma dimostra chiaramente un netto spostamento verso le piogge acide con valori simili a quelli risultanti da misurazioni effettuate in Germania (figura 2.4.).

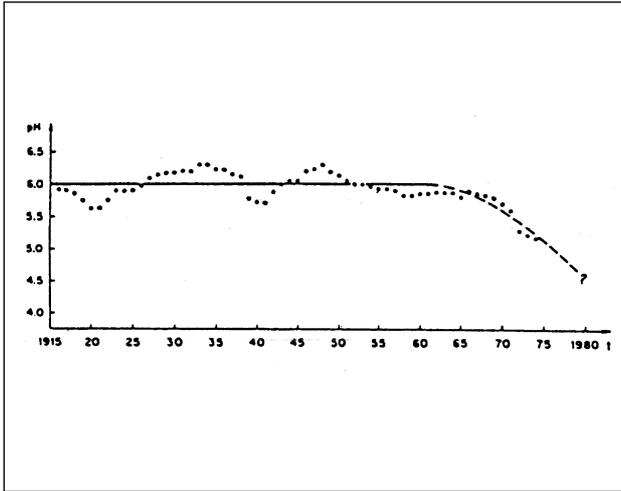


Figura 2.3 Sviluppo del valore pH nel ghiaccio del passo Griffeti ad una quota di 4450 m [2.13]. Il valore pH rappresenta la misura per la concentrazione di ioni di idrogeno in una soluzione:

- acqua pura (neutrale)      valore pH = 7
- soluzione acida            valore pH < 7
- soluzione basica            valore pH > 7

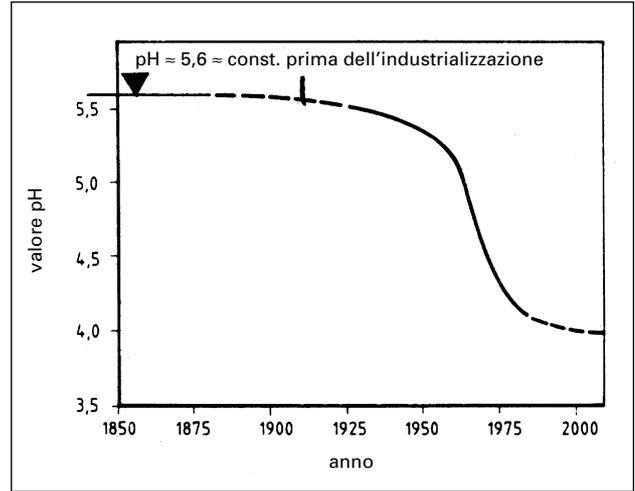


Figura 2.4 Modifiche del valore pH nella pioggia secondo le misurazioni effettuate dal servizio meteorologico tedesco [4.7].

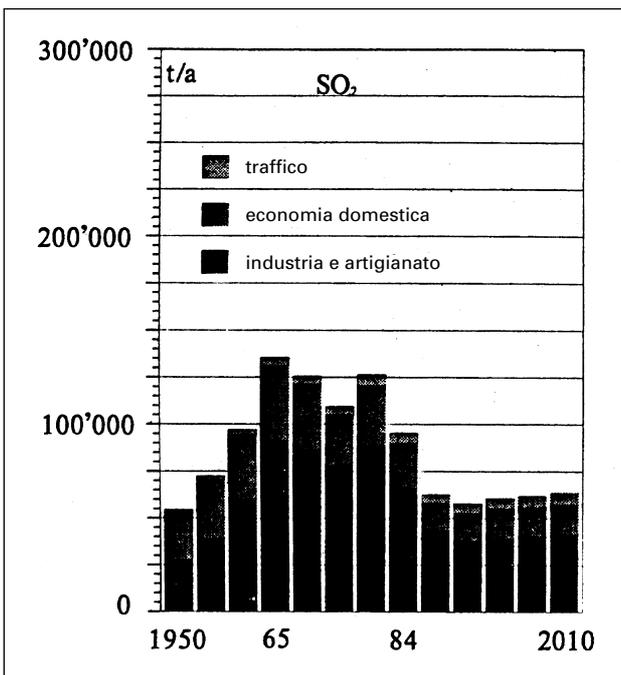


Figura 2.5 Sviluppo delle emissioni di anidride solforosa dal 1950 al 2010 [2.14].

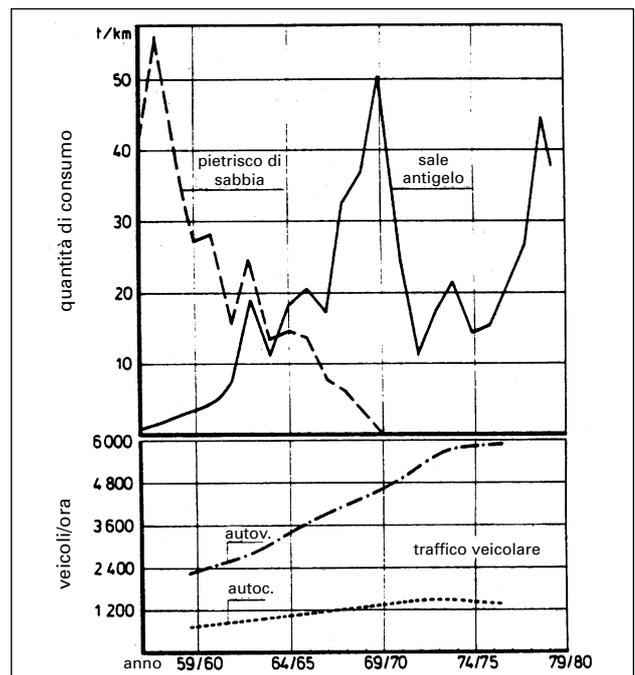


Figura 2.6 Consumo di prodotti antigelo ed incremento di traffico in Germania nel periodo 1959 e 1980 [4.7].

Su questi carichi antropogeni l'uomo ha la possibilità di influire soprattutto attraverso disposizioni di legge con conseguenti provvedimenti tecnologici. Lo sviluppo delle emissioni di anidride solforosa in Svizzera illustrato nella figura 2.5, dimostra la possibilità di ottenere dei miglioramenti importanti.

Lo sviluppo di altri effetti dannosi può essere dimostrato in modo simile. La figura 2.6 illustra, ad es., lo sviluppo del consumo di prodotti antigelo. In molti casi i dati disponibili sono carenti. Si osserva inoltre che esistono poche conoscenze sul rapporto tra tipo ed intensità di un influsso e la resistenza del materiale da costruzione.

I meccanismi di invecchiamento e di danneggiamento più importanti sono:

– **Il degrado dovuto ad agenti atmosferici**

Questo concetto viene solitamente utilizzato per la pietra naturale. Lo stesso è riferito alle modifiche della superficie della pietra causate da agenti esterni.

– **La corrosione**

In senso lato corrosione significa danno sulle superfici esterne provocate da reazioni chimiche tra materiale e componenti dell'ambiente circostante. Il concetto non è quindi circoscritto alla sola corrosione di metalli. Comunque nella prassi si tende a paragonarlo.

– **I problemi degli strati limite**

Nella superficie di contatto tra due materiali collegati e con caratteristiche e comportamenti differenti, possono verificarsi dei danni nella forma di distacco e di scrostamento (ad es. tra lo strato di protezione ed il materiale da costruzione che deve essere protetto).

Nei corrispondenti capitoli sui singoli modi di costruzione troverete ulteriori indicazioni particolari sugli effetti ed i meccanismi di invecchiamento e danneggiamento.

## 2.4 Garanzia di qualità

In molti settori industriali la garanzia di qualità (GQ) è da molti anni parte integrante ed indispensabile dell'attività lavorativa. Per contro, il settore edile si trova all'inizio di un importante sviluppo. La GQ è comunque praticata per costruzioni speciali come centrali elettronucleari e piattaforme petrolifere offshore. D'altra parte gli impulsi decisivi non sono stati determinati dal settore dell'edilizia ma da quello della costruzione di macchine e dall'industria nucleare e petrolifera. La GQ ha comunque una lunga tradizione nell'edilizia, vedi l'illustrazione in [2.15]. Le testimonianze più antiche risalgono a Hammurabi (Re Babilonese dal 1727-1686 a.C.) e Vitruv.

La GQ sistematica è ancora poco presente nell'edilizia svizzera. Secondo i rapporti annuali del gruppo di lavoro svizzero per la promozione della qualità (SAQ) nelle ca. 700 ditte membri ne sono rappresentate soltanto 10 che operano nel settore dell'edilizia.

Sulla tematica GQ esistono molte pubblicazioni elaborate negli ultimi anni [vedi 2.16]. Anche nella documentazione del PI EDIL sono incluse ulteriori indicazioni [1.1]. L'unificazione generale riferita a questo settore è molto avanzata. La figura 2.7 dà una visione sulle corrispondenti norme ISO riprese anche dalla Svizzera. D'altra parte i concetti e le prefigurazioni di tipo organizzativo contenuti in queste norme non sono utilizzabili direttamente nell'edilizia. Un gruppo di lavoro all'interno della SIA ha il compito di elaborare degli adattamenti a queste necessità.

Anche le norme SIA relative alle nuove strutture portanti illustrate nel cap. 2.1, contengono già gli elementi più importanti di una GQ. A questo proposito è richiesto, per i singoli materiali e procedure da costruzione una **autoverifica** da parte degli esecutori medesimi ed un controllo esterno da parte di un ente pubblico di controllo. **La conseguente conversione dei provvedimenti richiesti dalla teoria alla pratica è in questo caso determinante. Questa trasformazione è possibile soltanto se anche i committenti rispondono a queste esigenze e se nelle ditte esecutrici, soprattutto a livello di direzione, esiste la volontà di assicurare il requisito di qualità nell'azienda.**

La garanzia di qualità non dovrebbe comprendere soltanto la fabbricazione del prodotto e l'esecuzione sul cantiere, ma anche i settori del **management di progettazione** e l'effettiva **progettazione**. Gli strumenti ordinatori, già citati nel

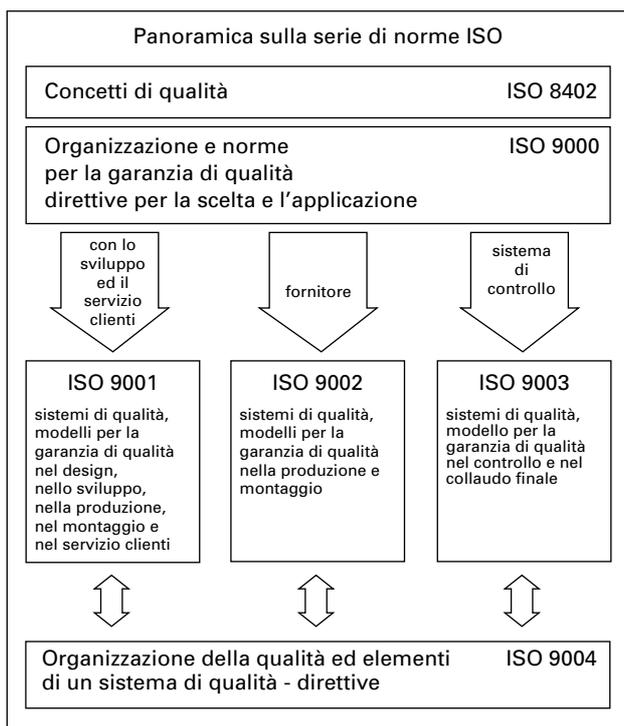


Figura 2.7 Panoramica sulla serie di norme ISO per la garanzia di qualità; le stesse sono ottenibili sotto forma di norme svizzere [2.16].

cpv. 2.1, una chiara determinazione delle responsabilità ed il flusso di informazioni sono elementi molto importanti.

La progettazione e l'esecuzione di provvedimenti di mantenimento richiedono una lunga esperienza nell'applicazione di sistemi di protezione. A questo proposito deve essere segnalato anche il ruolo del committente nella scelta delle ditte idonee.

La garanzia di qualità costa. La relativa quota [vedi 4.7] viene valutata tra l'1 ed il 5% dei costi di realizzazione complessivi di una costruzione. Una garanzia di qualità opportuna significa anche per il committente, un risparmio a dipendenza della riduzione dei costi per il mantenimento del valore e per le ditte nessun costo per l'eliminazione di danni e manchevolezze (compresi i costi di progetto). Nella valutazione della spesa per la GQ bisogna sempre partire dai costi complessivi.

È molto importante non lesinare gli sforzi per assicurare una GQ opportuna e soprattutto non perdersi in un fiume di carta e formulari, anche se alcune prescrizioni ed un minimo di documentazione sono necessarie. Si tratta inoltre di «effettuare un controllo» della qualità non soltanto sul cantiere. È molto più importante un «Engineering for quality» cioè un'adeguata progettazione preventiva che crea delle chiare basi per l'esecuzione.

## 2.5 Compatibilità ambientale

È prevedibile che in un prossimo futuro gli esperti attivi nel campo dell'edilizia debbano interessarsi maggiormente della compatibilità ambientale dei materiali e delle procedure di costruzione utilizzate. Di seguito sono indicate le basi legali più importanti a livello federale. Attualmente le ordinanze sono state applicate solo parzialmente nella pratica. Ciò dovrebbe cambiare poco a poco. A questo proposito anche le disposizioni europee sull'edilizia, equivalenti a quelle sulla sicurezza e la facoltà d'uso, contemplano disposizioni riguardanti l'igiene, la salute e la protezione ambientale. Nei capitoli sui singoli modi di costruzione vengono citati i gruppi dei prodotti e le procedure. Gli stessi sono valutati in base alla loro compatibilità ambientale soltanto in casi particolari. In questo campo sono necessari ulteriori lavori di approfondimento.

L'influsso delle disposizioni sulla protezione ambientale è visibile già attualmente ad es. nei sistemi di protezione delle costruzioni in acciaio ed in legno.

A causa del carico ambientale alcuni gruppi di prodotti non possono più essere utilizzati, ciò che ha portato allo sviluppo di nuovi sistemi di protezione compatibili con l'ambiente.

**Ordinanze della Confederazione:**

- L'ordinanza sulle sostanze pericolose per l'ambiente (ordinanza sulle sostanze, StoV) del 9 giugno 1986 (situazione 1. aprile 1991) disciplina la valutazione della compatibilità ambientale ed il trattamento delle sostanze pericolose per l'ambiente. La stessa include in particolare il principio della responsabilità personale (autocontrollo) del fabbricante in merito alla compatibilità ambientale, senza prescrivere una dichiarazione completa dei prodotti.
- L'ordinanza contro l'inquinamento atmosferico (OIAT) del 16 dicembre (situazione 1. aprile 1991) contiene, tra l'altro, i limiti delle emissioni e le tabelle dei materiali cancerogeni.
- L'ordinanza sul trasporto di rifiuti speciali (VVS) del 12 novembre 1986 (stato 1. luglio 1991) contiene la lista dei rifiuti speciali in Svizzera.
- L'ordinanza tecnica sui rifiuti (TVA) del 10 dicembre 1990 definisce la natura dei rifiuti ed il relativo trattamento (incenerimento, tipi di discariche). La stessa prescrive inoltre in quali discariche devono essere depositati i diversi rifiuti (discariche per materiali inerti, residui da fabbricazione e quelli prodotti dai reattori).

## 2.6 Edifici meritevoli di tutela

Prima di procedere alla progettazione di provvedimenti di conservazione deve essere chiarito se l'edificio in esame è meritevole di tutela dal punto di vista storico, architettonico e artistico. In questo modo è possibile evitare lungaggini e maggiori costi nella progettazione, in quanto le riflessioni fatte sulla tutela dei monumenti possono essere determinanti nella scelta dei sistemi di protezione.

Ulteriori indicazioni in relazione agli edifici storici in pietra naturale sono citate nel cap. 7.5 (si richiama, tra l'altro, anche la risoluzione per la tutela del patrimonio storico ed architettonico svizzero del 14 novembre 1986).

A questo proposito va osservato che anche edifici costruiti con materiali da costruzione più moderni, cioè calcestruzzo ed acciaio, possono essere considerati degni di protezione.



## **3. Esigenze poste ai sistemi di protezione e principi di scelta**

---

<b>3.1</b>	<b>In generale</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Esigenze generali poste ai sistemi di protezione</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>Riflessioni specifiche sulle costruzioni ed il relativo materiale in base ad un esempio</b>	<b>36</b>

---

### 3. Esigenze poste ai sistemi di protezione e principi di scelta

#### 3.1 In generale

I principi per la progettazione di strutture portanti contenuti nella norma SIA 160, possono essere utilizzati anche per proporre e scegliere i sistemi di protezione.

In relazione alla **sicurezza** ed **all'idoneità d'uso** è necessario partire dalle esigenze poste nei confronti della struttura portante da proteggere. Nella figura 3.1. sono illustrate le caratteristiche di qualità e le proprietà di una struttura portante. Nelle destinazioni indicate nella norma SIA 160 sono incluse anche le possibilità di manutenzione e di rinnovamento oltre alla sostituzione di sistemi parziali.

- Sicurezza
- Idoneità d'uso
  - funzionalità
  - durevolezza
  - possibilità di manutenzione
  - possibilità di rinnovamento
  - sostituzione (tra l'altro di un sistema di protezione)
  - aspetto

Figura 3.1 Caratteristiche di qualità e proprietà di strutture portanti.

In relazione alla tematica dei sistemi di protezione è da segnalare in primo luogo l'idoneità d'uso di una struttura portante, essendo la stessa già interessata prima che si verifichi un problema di sicurezza della capacità di portata. In questo ambito ci sembra importante mettere in evidenza i casi in cui il controllo degli elementi della struttura portante non è possibile, a meno di sforzi sproporzionati, nei quali si può verificare inaspettatamente un guasto del sistema di protezione e quindi della struttura portante.

Le caratteristiche di qualità e le proprietà delle strutture portanti non stabilite con l'ausilio di norme, devono essere concordate con il committente. In questo ambito assumono importanza anche considerazioni di carattere economico.

Nella figura 3.2. viene illustrata schematicamente la diminuzione della qualità di una struttura portante nel corso del tempo. Il comportamento illustrato nel grafico può considerarsi regola generale. Infatti, in certi casi, è possibile ottenere un miglioramento delle proprietà specifiche come ad es. una maggiore resistenza alla compressione del calcestruzzo.

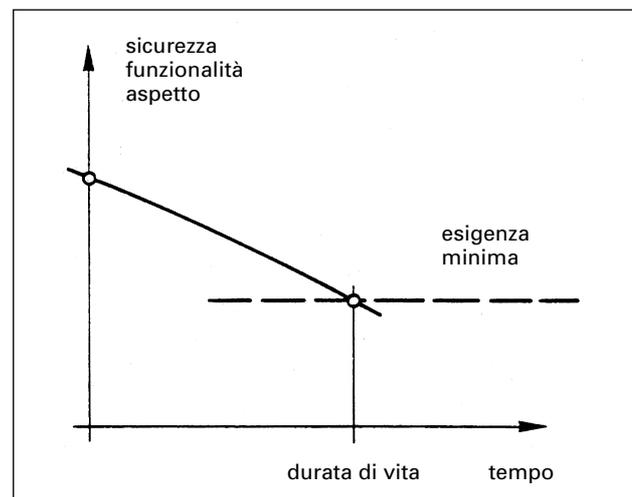


Figura 3.2. Lo sviluppo generale delle proprietà di una struttura portante in funzione del tempo.

La qualità di una struttura portante o di singoli elementi solitamente non diminuisce di colpo; ad eccezione di eventi imprevedibili straordinari (come ad es. urto, fuoco).

La diminuzione usuale della qualità può essere evitata o, per lo meno rallentata, con **regolari provvedimenti di mantenimento** o, in altri termini, la durata di vita può essere aumentata con provvedimenti adeguati (figura 3.3). La facoltà di manutenzione e di rinnovamento sono quindi componenti della qualità di una struttura portante. In questo ordine di idee le possibilità di sostituzione di sistemi parziali (come ad es. un sistema di protezione) rappresentano un aspetto importante. La durata di vita di una struttura portante o di elementi della stessa è da ritenere esaurita quando sono state raggiunte determinate esigenze minime. Queste esigenze minime, se non sono state determinate in base a delle norme, devono essere stabilite caso per caso.

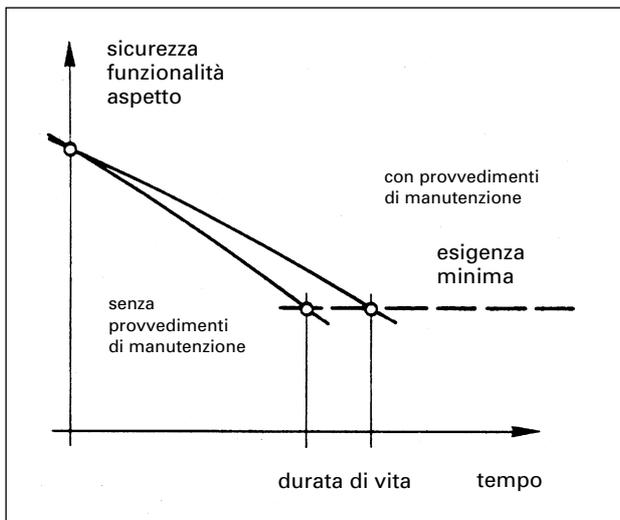


Figura 3.3 Sviluppo generale delle caratteristiche di una costruzione con e senza provvedimenti di mantenimento.

## 3.2 Esigenze generali poste ai sistemi di protezione

In base ad esigenze poste nei confronti di una struttura portante già realizzata o in fase di progettazione, è necessario dapprima chiarire se, accanto alla capacità di autoprotezione del materiale da costruzione, deve essere utilizzato un sistema di protezione supplementare. I criteri decisionali sull'utilizzo o meno di un sistema di protezione supplementare, oltre alla natura ed alla funzione della struttura portante sono:

- la durata di utilizzazione residua per costruzioni esistenti, rispettivamente la durata di utilizzazione prevista per nuove costruzioni
- la natura degli influssi (tra l'altro deve essere chiarito, se sia possibile ridurre o eliminare gli influssi dannosi con dei provvedimenti idonei)
- le disposizioni vigenti (leggi, norme, direttive di un committente)
- l'analisi costi-benefici

Se la decisione per l'utilizzo di un sistema di protezione supplementare è stata presa, questo sistema protettivo deve essere considerato parte integrante della struttura portante e trattato conseguentemente nella progettazione.

Come già citato nel cap. 3.1 le riflessioni sull'idoneità d'uso fatte nella presente documentazione sono prioritari. Richiamiamo comunque ancora l'attenzione sul fatto che nel caso singolo può esistere una relazione tra il sistema di protezione e la sicurezza della struttura portante. Le caratteristiche più importanti di un sistema di protezione sono la sua funzionalità e la sua durevolezza (figura 3.4). Nel caso in cui si deve tener conto anche di criteri estetici, l'importanza dell'aspetto del sistema di protezione deve essere considerato alla stessa stregua delle caratteristiche citate. A prescindere dalla funzione statica esercitata da alcuni sistemi di protezione, le esigenze di sicurezza della struttura portante dei sistemi medesimi, giocano un ruolo subordinato.

- Funzionalità
  - funzionalità delle strutture portanti
  - durevolezza della struttura portante
  - aspetto della struttura portante
- Durevolezza
- facoltà di manutenzione
- possibilità di sostituzione
- aspetto

Figura 3.4. Caratteristiche di qualità e proprietà dei sistemi di protezione.

La funzionalità del sistema di protezione deve garantire la funzionalità, la durevolezza ed un aspetto, rispettivamente un'immagine gradevole, della struttura portante (ad es. impedire la penetrazione di acqua che danneggia l'aspetto della costruzione).

Se la durevolezza del sistema di protezione è così elevata che la sua durata di vita raggiunge o supera la durata d'utilizzo della struttura portante medesima, la sostituzione, in tal caso, non deve essere necessariamente garantita (figura 3.5). A questo proposito va comunque osservato che a causa di errori fatti al momento dell'esecuzione pratica, questi obiettivi non possono talvolta essere raggiunti. È quindi necessario prevedere delle strategie che permettano una correzione successiva (ad es. iniezioni, compartimentazione di settori impermeabilizzati).

Nel caso in cui la durata di vita di un sistema di protezione è inferiore alla durata d'utilizzo della struttura portante, devono essere previsti dei provvedimenti adeguati affinché il sistema protettivo possa raggiungere una durata di vita che corrisponda o superi la durata d'utilizzo della costruzione o della struttura portante.

Questi provvedimenti comprendono:

- la manutenzione costruttiva
- la manutenzione dell'esercizio
- la sostituzione

La figura 3.6 illustra schematicamente un possibile decorso della funzionalità e/o dell'aspetto di un sistema di protezione in funzione del tempo, nel caso in cui si ricorra a provvedimenti di manutenzione della costruzione, rispettivamente lavori di riparazione del sistema di protezione, che possano prolungarne la durata di vita (ad es. iniezioni nelle fessure, riparazione dei giunti e riparazione locale di rivestimenti).

In molti casi è possibile prolungare la durata di vita del sistema di protezione con una manutenzione dell'esercizio (figura 3.7).

La stessa consiste ad es. nella diminuzione o nell'eliminazione di influssi dannosi che danneggiano il sistema (pulizia regolare delle superfici, manutenzione di sistemi di drenaggio, ecc.). Se la durata di vita del sistema è inferiore alla durata d'utilizzo prevista per la struttura portante e se anche con i provvedimenti di manutenzione costruttiva o dell'esercizio non si riesce a prolungarla in modo importante, deve essere garantita la possibilità di una loro sostituzione.

Il decorso della funzionalità e/o dell'aspetto di un sistema di protezione, nel caso in cui lo stesso venga sostituito due volte, è illustrato nella figura 3.8.

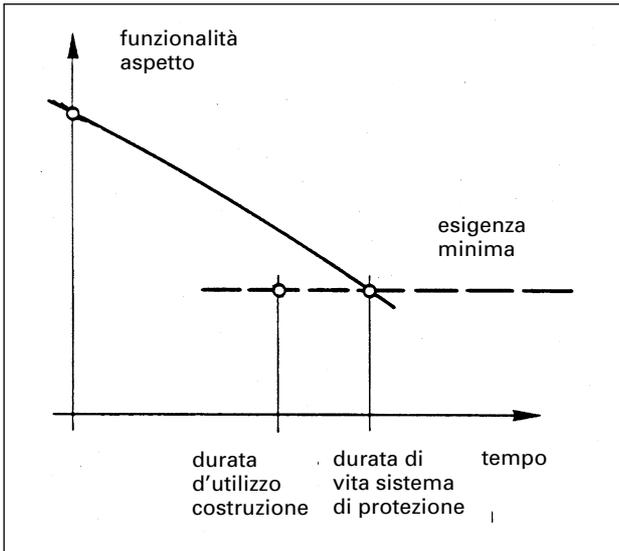


Figura 3.5 Evoluzione generale delle proprietà di un sistema di protezione senza provvedimenti particolari (la durata di vita del sistema di protezione è maggiore alla durata d'utilizzo dell'opera).

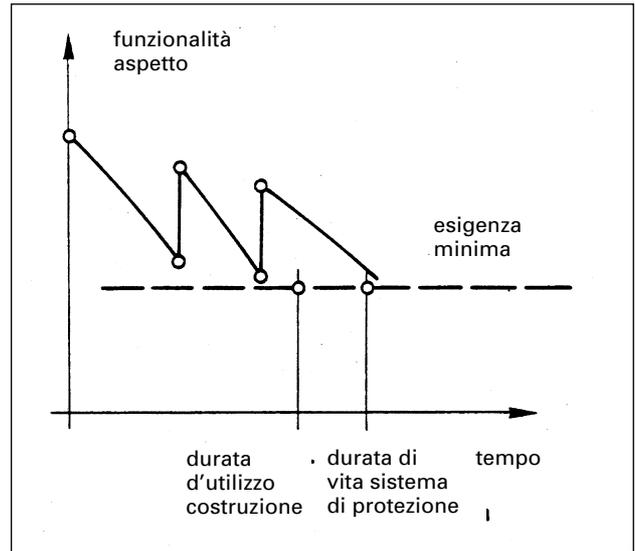


Figura 3.6 Evoluzione generale delle proprietà di un sistema di protezione con provvedimenti di manutenzione costruttiva.

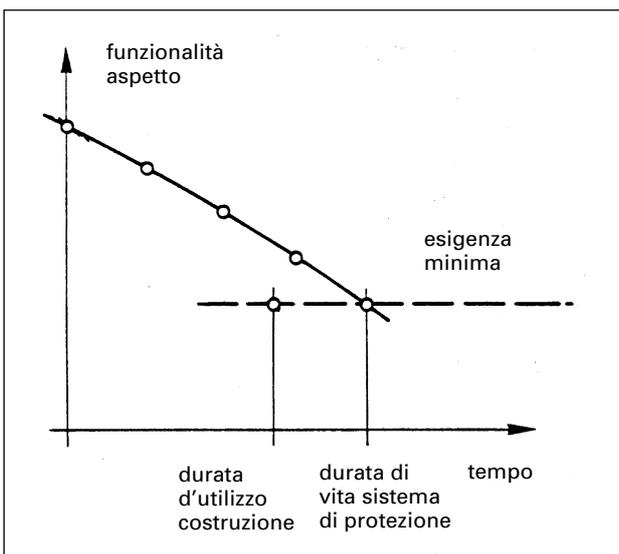


Figura 3.7 Evoluzione generale delle proprietà di un sistema di protezione; grazie alla manutenzione dell'esercizio la sua durata di vita supera la durata d'utilizzo dell'opera.

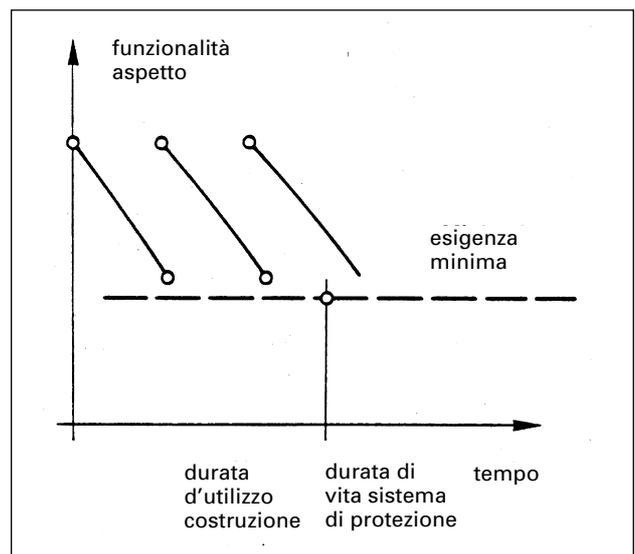


Figura 3.8 Evoluzione generale delle proprietà di un sistema di protezione nel caso di una sostituzione periodica dello stesso.

### 3.3 Riflessioni specifiche sulle costruzioni ed il relativo materiale in base ad un esempio

Le argomentazioni che seguono dimostrano, in base ad un esempio, quali considerazioni specifiche sul materiale e le costruzioni devono essere fatte in relazione ai sistemi di protezione. Come esempio abbiamo scelto una tipica galleria di protezione. La stessa protegge gli utenti della strada da valanghe e caduta sassi. Condizioni simili si riscontrano anche in gallerie di protezione contro l'immissione di rumori a salvaguardia degli abitati vicini.

Le risultanze di queste considerazioni possono essere applicate anche ad altre costruzioni. Le esigenze richieste e gli influssi visibili sugli elementi strutturali portanti di una galleria di protezione si riscontrano anche in altre opere.

Le considerazioni espone devono servire agli ingegneri progettisti sia come occasioni di riflessione sia per le decisioni personali.



Figura 3.9. Galleria di protezione.

### Sistemi protettivi contro la caduta di valanghe e sassi nelle gallerie di protezione

Nella figura 3.10 è illustrata la sezione trasversale di una tipica galleria di protezione. Di regola si tratta di una costruzione in cemento armato, in cui è già inserita la struttura composita per la volta della galleria.

Per decidere sull'eventuale opportunità di impiegare ulteriori sistemi di protezione, è necessario partire dall'**utilizzo**, rispettivamente dalla **funzione** dell'opera. La stessa deve essere determinata nel piano d'utilizzazione. Nel caso in esame si tratta di proteggere per la **durata d'utilizzo prevista**, rispettivamente per la **durata residua d'utilizzo**, il vettore di traffico contro la caduta di valanghe e sassi ed contro altri influssi dannosi. Per garantire la sicurezza stradale è inoltre necessario evitare la formazione di ghiaccio sulle strade e di ghiaccioli sul campo stradale provocati dalla penetrazione di acqua. Ciò ci porta ad esaminare le esigenze poste nei confronti dell'idoneità d'uso e della sicurezza mentre di seguito tratteremo prioritariamente l'idoneità d'uso.

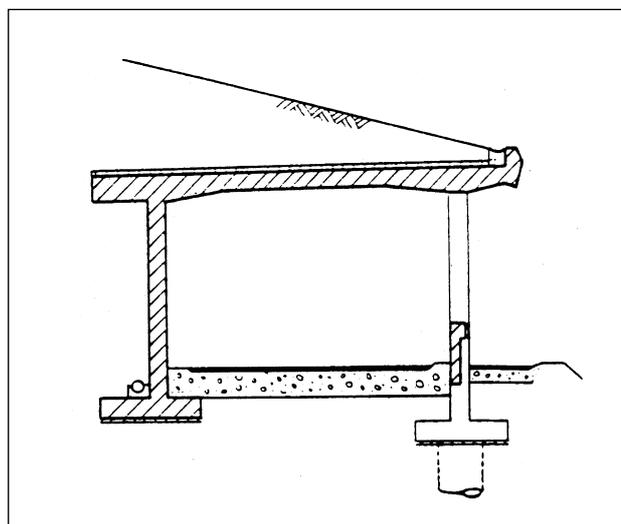


Figura 3.10 Sezione trasversale di una tipica galleria di protezione con colonne di appoggio sul lato a valle.

Le caratteristiche che si manifestano dovute agli influssi esterni, rispettivamente delle condizioni d'uso, costituiscono un'ulteriore base decisionale. In base alle indicazioni del cap. 2.3 gli stessi possono essere suddivisi nel modo che segue:

- carichi statici e dinamici:  
carichi propri, copertura di terra, spinta del terreno sul lato a monte, pressione dell'acqua, caduta e sedimentazione di valanghe, neve, caduta sassi ed urti causati da veicoli.  
(Questa categoria ha poco a che fare con la decisione su un eventuale utilizzo di sistemi protettivi. Un'eccezione è rappresentata dalla pressione dell'acqua. Se ci si decide per un ulteriore sistema di protezione, devono essere considerate le ripercussioni sui relativi carichi).
- Influssi meccanici:  
danneggiamenti causati da veicoli e spazzaneve, pressione del ghiaccio, erosione locale del manto stradale.
- Influssi climatici:  
variazioni di temperatura (deformazioni), irraggiamento solare, cicli di gelo e rugiada.

- Influssi chimici:  
getti e spruzzi d'acqua contenenti sale antigelo, acque aggressive nel suolo che danneggiano il calcestruzzo e/o l'acciaio (ad es. acque solfatiche) e gas inquinanti causati dal traffico.
- Influssi biologici  
crescita delle piante (penetrazione di radici), microorganismi.

Nel caso singolo deve essere chiarito, se e con quale intensità si verificano gli influssi citati e se ne possono comparire degli altri che devono essere tenuti in considerazione.

Il prossimo passo consiste nello stabilire in quale misura questi influssi possono pregiudicare la **funzionalità, la durevolezza e l'aspetto**.

Il risultato ottenuto dovrebbe dare una chiara indicazione sulla capacità di autoprotezione del materiale da costruzione dell'opera in cemento armato o se sia necessario un ulteriore sistema protettivo per singoli elementi della struttura portante.

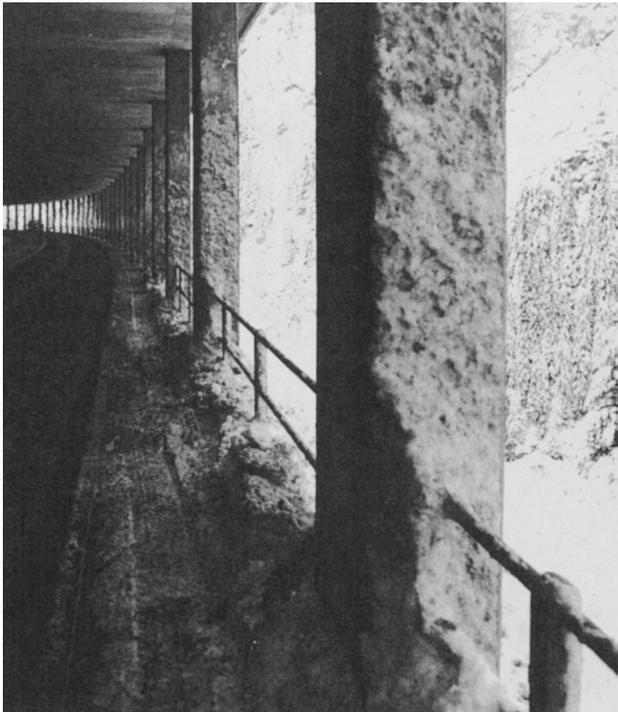


Figura 3.11. Fanghiglia di neve attaccata sugli elementi portanti della galleria; gli influssi sono simili a quelli causati dagli spruzzi d'acqua.

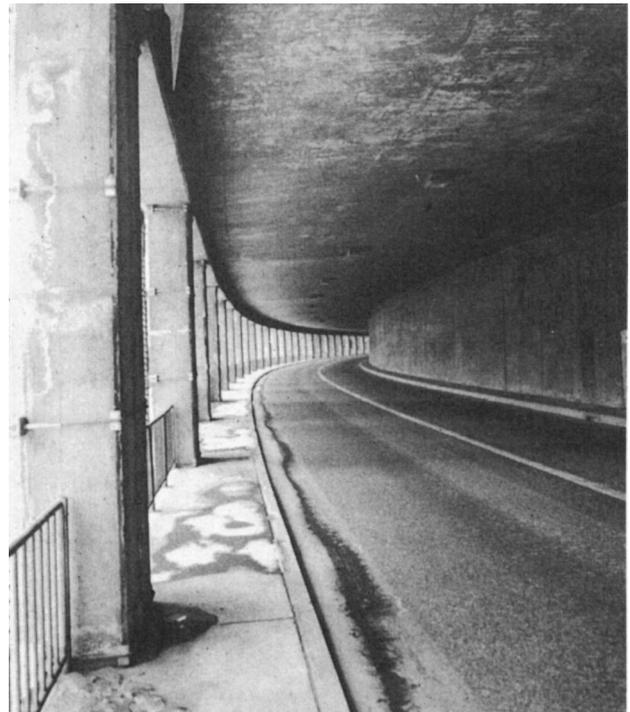


Figura 3.12. Alla fine del periodo invernale: deposito di sale antigelo, ben visibile lungo il bordo della carreggiata e sul marciapiede.

Nella progettazione e nell'esecuzione di una nuova galleria esiste la possibilità di imparare da errori precedenti e di sviluppare e costruire quindi le strutture ed i dettagli in modo ottimale.

Per una galleria esistente è necessario dapprima fare un rilevamento ed una valutazione accurati delle condizioni. Soltanto su questa base è possibile iniziare con la progettazione dei provvedimenti di mantenimento.

I singoli elementi della struttura portante di una galleria sono sottoposti a svariati influssi ed esigenze e devono quindi essere trattati separatamente con la seguente articolazione (figura 3.13):

- volta interna, influssi da sopra (esterni) ①
- volta interna, influssi da sotto (interni) ②
- zona bordi della volta interna ③
- parete, influssi dall'esterno ④
- parete, influssi dall'interno, appoggio ⑤

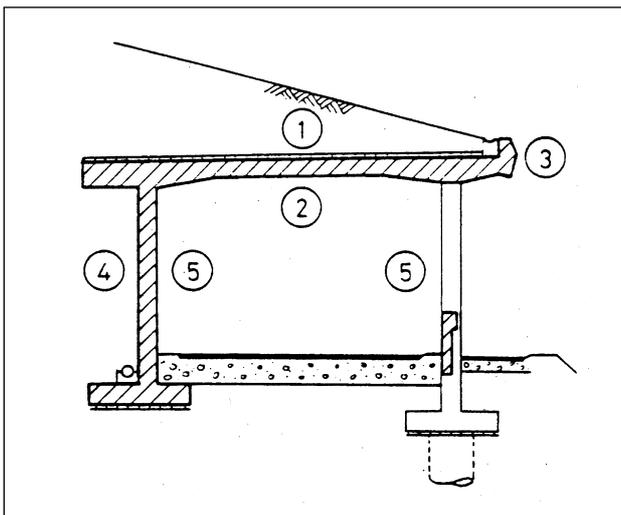


Figura 3.13 Sezione trasversale di una tipica galleria di protezione con le zone in cui si manifestano gli influssi.

### Volta interna della galleria Influssi da sopra (esterni) ①

Le volte di una galleria di protezione sono praticamente sempre delle costruzioni in cemento armato o composite. Per il lato superiore della volta può quindi essere supposto che il materiale da costruzione sia cemento armato. Gli influssi determinanti per la scelta del sistema di protezione con gli effetti più importanti sulle caratteristiche di qualità della costruzione sono illustrati nella tabella seguente:

Influssi	Caratteristiche di qualità		
	funzionalità	durevolezza	aspetto
acqua	*	*	*
acqua solfatica		*	
erosione della superficie		*	
forze dovute alla crescita delle piante (radici)		*	*
pressione del ghiaccio		*	

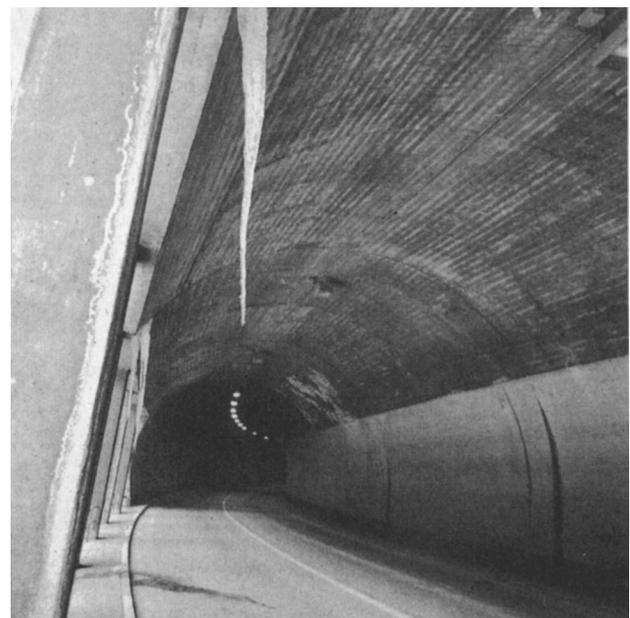


Figura 3.14 Formazione di ghiaccioli causata dalla penetrazione di acqua in un giunto di dilatazione.

Per non pregiudicare la funzionalità della galleria, l'acqua non deve penetrare attraverso la soletta. Se l'acqua gocciolasse sulla carreggiata si potrebbero formare del ghiaccio o ghiaccioli pericolosi (figura 3.14).

La penetrazione di acqua può anche pregiudicare l'aspetto ad es. con l'insorgere di macchie o, nel caso in cui viene favorita la crescita di piante, con la formazione di muschio. La penetrazione di acqua può chiaramente portare alla corrosione dell'armatura e quindi ridurre la durezza. Infine può essere messa in pericolo perfino la sicurezza portante.

La penetrazione di acqua nella soletta di cemento armato è resa possibile attraverso i punti degradati del calcestruzzo (nicchie di ghiaia, giunti di ritiro e di betonaggio) e le fessure larghe e continue, rispettivamente i giunti di dilatazione. L'intensità dell'influsso dipende dalla pressione dell'acqua. Nelle nuove gallerie la stessa può essere mitigata mediante provvedimenti idonei, come la posa di uno strato di drenaggio o prevedendo una sufficiente pendenza.

Queste considerazioni dimostrano chiaramente che la problematica della penetrazione d'acqua non dipende soltanto dall'efficacia di un ulteriore sistema protettivo, ma anche da molti altri dettagli costruttivi (come la presenza di giunti, drenaggi, pendenze, ecc.), dalle modalità di costruzione medesime (giunti di ritiro e di betonaggio), dalla qualità del calcestruzzo, dal contenuto dell'armatura e dalla sollecitazione statica (fessure).

### **L'esecuzione della volta della galleria con ermetizzazione e giunti di dilatazione**

Quasi tutte le volte delle gallerie costruite a tutt'oggi, sono provviste di un'ermetizzazione flessibile su tutta la superficie. Ogni 20 - 25 cm sono installati dei giunti di dilatazione ermetizzati mediante una struttura di giunti. Per questo tipo di costruzione molto diffuso è quindi stato scelto un sistema protettivo supplementare costituito dall'ermetizzazione sistemica, dalla struttura di giunti ed anche dalle bordure marginali. In alcuni casi si è rinunciato all'ermetizzazione su tutta la superficie; soltanto i giunti sono provvisti di una struttura ermetizzante. Il sistema di protezione ha il compito di impedire la penetrazione d'acqua nello spazio della carreggiata. Ci si può chiedere se questi sistemi protettivi hanno dato dei buoni risultati. I controlli effettuati dall'Ufficio federale per le costruzioni stradali hanno dimostrato che i problemi di ermeticità non sono imputabili alle chiusure ermetiche, bensì ai giunti ed alle bordure marginali (figura 3.15).

Il rilevamento della condizione delle strutture dei giunti nelle volte delle gallerie situate in regioni di montagna, ha messo in evidenza come gli stessi rimangono ermetici per una durata di 5 - 10 anni. In seguito, tra i 10 e 15 anni, si verifica un forte incremento del numero di giunti difettosi e dopo 30 anni, l'80% degli stessi non è più a tenuta stagna (figura 3.16 [3.1] vedi l'esperienza fatta con la strada del Sempione N.9). Nella figura 3.17 è rappresentata una serie di strutture di giunti che nel corso del tempo hanno perso la loro ermeticità. Si può osservare come trovi ulteriore conferma il fatto che i giunti hanno dei lati deboli.

La riparazione di queste strutture di giunti difettosi è molto dispendiosa. A causa della posizione accostata ai versanti delle gallerie di protezione ed a dipendenza della necessità di assorbire gli influssi dovuti alla caduta di sassi e valanghe, si rende necessaria una copertura molto importante in terra. La stessa raggiunge in molti casi uno spessore di 2 - 3 metri sul lato a monte. Ciò ha per conseguenza che ogni lavoro effettuato sul sistema di protezione, a partire dal rilevamento dello stato, è molto difficile e dispendioso. Nel caso specifico le esigenze citate nel cap. 3.2, poste nei confronti della facoltà di manutenzione e di sostituzione di un sistema protettivo, sono messe in discussione. Le premesse per i provvedimenti di conservazione in caso di una copertura in terra più ridotta sono migliori ma comunque ancora dispendiosi. Per le future gallerie devono quindi essere trovate delle soluzioni nuove. Una delle soluzioni consiste nel passaggio a delle strutture monolitiche (vedi di seguito).

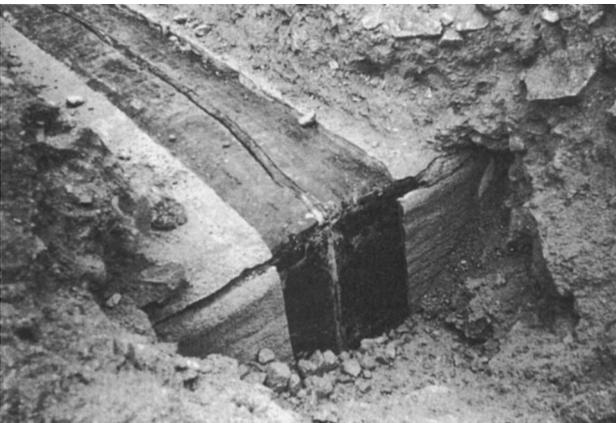


Figura 3.15 Difetti di impermeabilizzazione della volta della galleria sul lato a valle e nel raccordo a monte tra parete e volta

Ciò non significa comunque che l'uso di sistemi di protezione supplementari non debba, in futuro, essere raccomandato. Possono sussistere dei motivi per cui gli stessi debbano ancora essere previsti. Gli stessi sono proponibili solo se saranno contemporaneamente sviluppate delle strategie sostenibili dal profilo tecnico ed economico che garantiscono la facoltà di manutenzione e di sostituzione.

Alcuni accenni in merito sono indicati nella bibliografia punto [3.1]. Anche nella riparazione di strutture di giunti difettosi deve essere valutata, se sia possibile l'eliminazione dei giunti di dilatazione mediante la sostituzione dei relativi settori con calcestruzzo gettato in loco. Siccome l'opera subisce una modifica di sistema a causa di questo intervento, questo fatto deve essere tenuto in debito conto ed in particolare in relazione con lo stato effettivo delle fondazioni.

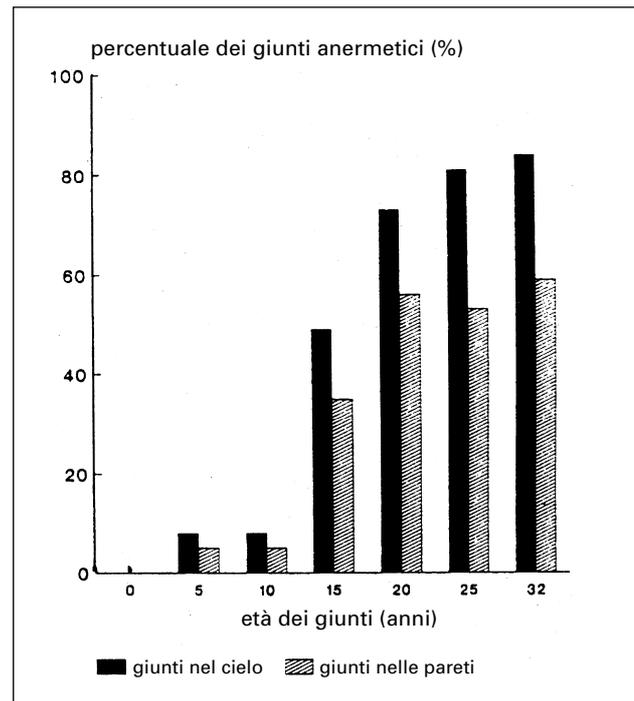


Figura 3.16 Decorso del danno nei giunti di dilatazione nelle gallerie di protezione [3.1].

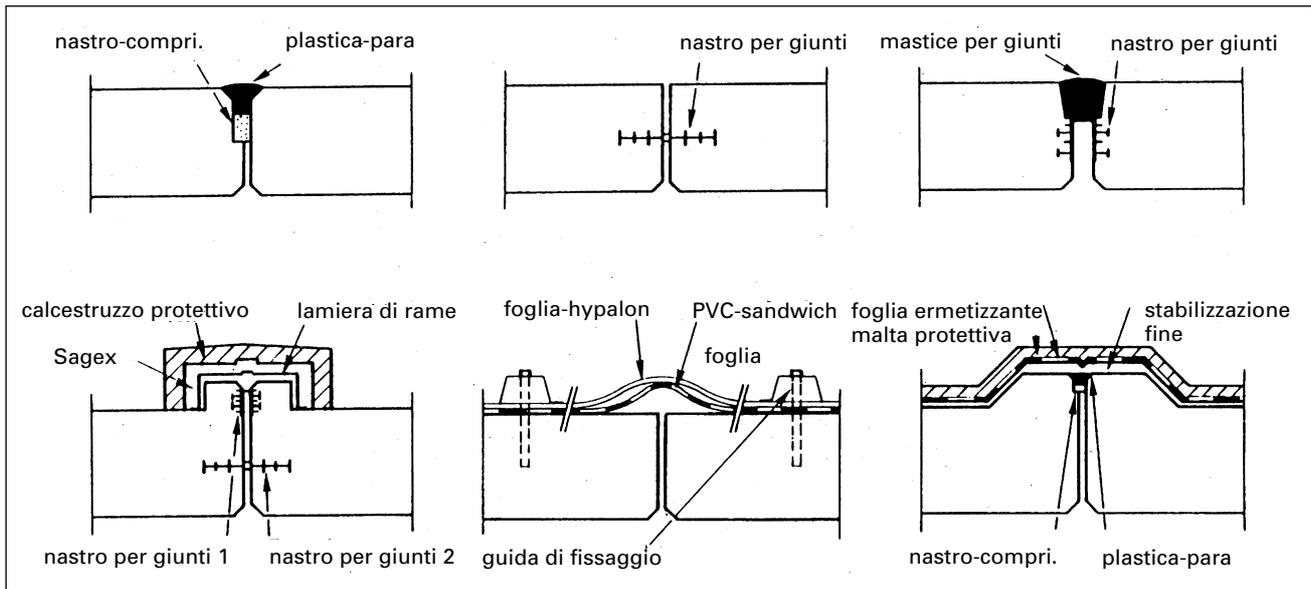


Figura 3.17 Esempi di costruzione di giunti di dilatazione nelle volte di gallerie di protezione contro la caduta di sassi e di valanghe divenuti anermetici nel corso del tempo [3.1].

### La volta della galleria eseguita in forma monolitica senza un ulteriore dispositivo esterno di protezione

Questo tipo di esecuzione si basa sulla capacità di autoprotezione del cemento armato ad armatura continua. Si può quindi rinunciare ad un sistema di protezione supplementare. Per evitare la penetrazione ed il passaggio di acqua sono molto importanti sia lo spessore del calcestruzzo sia le larghezze minime delle fessure. In caso di presenza di acque aggressive che possono danneggiare il calcestruzzo può essere utilizzato un cemento idoneo (ad es. cemento resistente al solfato nel caso di presenza di acque solfatiche).

Il passaggio dell'acqua deve essere impedito per non compromettere la durevolezza e la funzionalità e per evitare gli influssi negativi sull'aspetto. La penetrazione di acqua è importante soltanto per la durevolezza della costruzione in calcestruzzo. I controlli eseguiti negli ultimi anni hanno dimo-

strato che la larghezza di una fessura, entro certi limiti, non diminuisce la durevolezza, eccezion fatta per le fessure di separazione freatiche [3.2], [3.3]. Con riferimento alle esigenze ed ai provvedimenti da adottare per limitare le fessure, si rimanda alla norma SIA 162 (1989). Si può inoltre aggiungere che in base alle conoscenze odierne in materia di provvedimenti tecnologici relativi al calcestruzzo, l'esecuzione sistematica a tappe, la riduzione opportuna del fattore acqua/cemento, il successivo trattamento del calcestruzzo ed il controllo della qualità, sono ritenuti fattori più importanti rispetto a provvedimenti dedotti da calcolazioni. Nel caso di penetrazione di acqua attraverso una fessura sono possibili dei semplici provvedimenti di riparazione nella forma di iniezioni (figura 3.18). Queste riparazioni possono essere eseguite nello spazio della carreggiata, tenendo comunque conto del fatto che l'esecuzione può essere resa difficoltosa da un'altezza utile troppo ridotta.

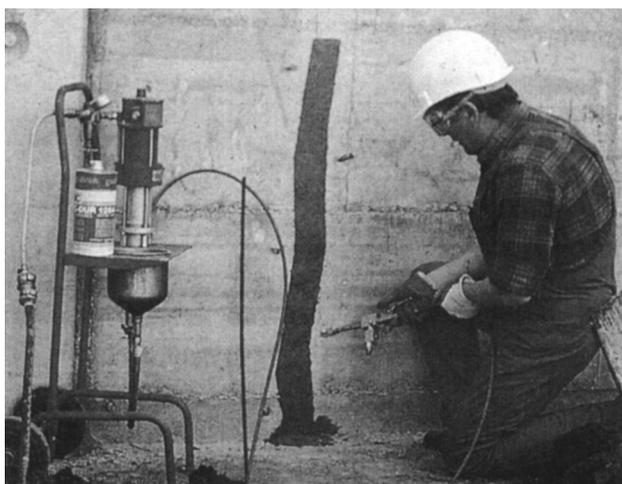


Figura 3.18 Iniezioni di fessure.

La vaporizzazione del sale antigelo costituisce l'influsso più importante sulla parete inferiore della volta della galleria. Gli effetti negativi si riscontrano sulla superficie complessiva interna della volta. In una costruzione massiccia in cemento armato senza dispositivo di protezione è possibile ovviare agli effetti dannosi con diversi provvedimenti. Lo spessore della copertura e la qualità del calcestruzzo (porosità) sono decisivi per la protezione dell'armatura. Per la riparazione di costruzioni in cemento armato si rimanda al cap. 4.4. Le possibilità di riparazione sono spesso limitate dalla necessità di assicurare lo scorrimento del traffico e da altezze utili insufficienti. Nel caso di una nuova costruzione questa problematica dovrebbe essere considerata in sede di progettazione.

In riferimento all'utilizzo di un ulteriore sistema protettivo supplementare della superficie sopra il calcestruzzo si rimanda al cap. 4.4.

Per la protezione dell'acciaio delle volte delle gallerie con strutture portanti dello stesso materiale possono essere applicate le raccomandazioni contenute nel cap. 5.

### Volta della galleria influssi dal basso (dalla carreggiata)

②

Per la scelta del sistema di protezione devono essere tenuti in considerazione i seguenti influssi:

Influssi	Caratteristiche di qualità		
	funzionalità	durevolezza	aspetto
sale antigelo (vaporizzazione dell'antigelo)		*	
gas nocivi: (gas di scarico)		*	
vegetazione			*
influssi meccanici		*	*

### Zona bordi, volta della galleria/appoggi

③

Per la molteplicità degli influssi a cui è esposta questa zona, la stessa deve essere progettata e mantenuta con particolare attenzione. Agli influssi cui è esposta la volta della galleria fin qui descritti, devono essere aggiunti quelli derivanti da estremi climatici presenti in questa zona della sezione trasversale della galleria. A causa della ridotta copertura di terra nella zona dei bordi, l'inerzia termica e la protezione meccanica della massa di terra vengono a mancare. Il settore dei bordi è quindi sottoposto a fortissime oscillazioni termiche di breve durata. La progettazione degli scarichi delle acque di infiltrazione e superficiali deve essere curata in modo particolare. La migliore progettazione di dettaglio può fallire se non viene dato sufficiente peso a questi influssi esterni ed alle relative combinazioni.

### Parete della galleria influssi dall'esterno

④

In generale devono essere tenuti in considerazione gli stessi influssi ed esigenze illustrate nel paragrafo ①.

La riparazione di un sistema di protezione supplementare costruito sulla superficie della parete sul lato montagna è praticamente impossibile.

Se è previsto un sistema di protezione supplementare lo stesso deve raggiungere una durata di vita uguale o maggiore a quella dell'opera (cap. 3.2).

I provvedimenti di mantenimento sono eseguibili soltanto dallo spazio della carreggiata. Se la parete in cemento armato presenta delle fessure dalle quali può penetrare acqua bisogna iniettarli. Nelle costruzioni esistenti in cui da diverso tempo non è stata eseguita la manutenzione, queste fessure sono spesso sinterizzate e quindi ermetizzate.

### Parete della galleria ed appoggi Influssi dall'interno (dallo spazio carreggiata)

⑤

Di regola si riscontrano influssi uguali a quelli indicati nella bibliografia sub ②.

Nelle gallerie stradali è più importante il danno provocato dal sale antigelo mischiato all'acqua spruzzato da parte delle auto contro la parete.

L'intensità del contenuto di sale è maggiore negli spruzzi d'acqua che non nella forma vaporizzata del sale antigelo (figure 3.19, 3.20).

Al momento di decidere sul sistema di protezione deve essere prestata particolare attenzione al settore inferiore della parete della galleria e degli appoggi. Alle superfici situate nella zona degli spruzzi d'acqua sono poste delle esigenze straordinarie. Se si decide di rinunciare ad un sistema di protezione speciale allora deve essere utilizzata una qualità di calcestruzzo molto alta e ciò è possibile soltanto con un rigoroso controllo della qualità ed una lavorazione del calcestruzzo con i più moderni mezzi tecnologici. A questo proposito deve essere tenuto in considerazione il fatto che eventuali danni sul calcestruzzo e sull'armatura sono praticamente irreversibili.

In questi casi la riparazione implica costi maggiori che non la sostituzione medesima del sistema di protezione.

Influssi	Caratteristiche di qualità		
	funzionalità	durevolezza	aspetto
sale antigelo (spruzzi d'acqua)		*	(*)
sale antigelo (vaporizzazione dell'antigelo)		*	(*)
gas nocivi gas di scarico		*	(*)
vegetazione		(*)	*
influssi meccanici		*	*

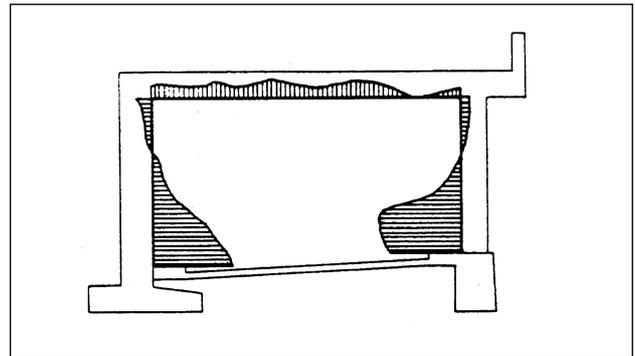


Figura 3.19 Decorso qualitativo della linea potenziale nell'appoggio, nella volta e nella parete di una sezione trasversale della galleria.

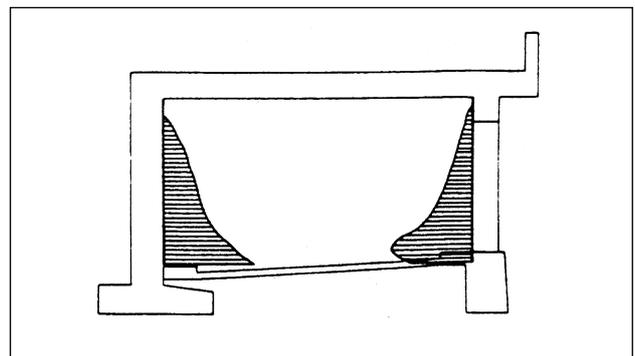


Figura 3.20 Decorso qualitativo del contenuto di cloruro nella superficie dell'armatura in una sezione trasversale della galleria.

Al momento della scelta di un sistema di protezione supplementare devono essere considerati sia il carico salino, sia i danni causati da eventuali urti di vetture oltre che di danni provocati dagli spazzaneve. Dopo queste analisi si possono prendere in esame prioritariamente i sistemi di protezione sostituibili o/e dispositivi di protezione riparabili, da utilizzare nelle zone di proiezione degli spruzzi d'acqua.

Negli appoggi è possibile sostituire l'intero elemento se questa possibilità è già stata prevista nella progettazione (ad es. appoggio in acciaio, appoggio in calcestruzzo prefabbricato).

### **Commento conclusivo**

Nell'elaborazione di questo capitolo gli autori hanno potuto constatare le grosse lacune esistenti sui criteri decisionali di scelta dei sistemi di protezione. Si tratta in particolare delle necessità di rivedere opinioni troppo ottimistiche sulla durata di vita dei diversi sistemi di protezione e di procedere ad un'analisi comparativa costi-benefici includendovi anche i costi di mantenimento. Queste conoscenze dovrebbero servire all'ingegnere progettista per la scelta ottimale dei sistemi di protezione. Si auspica che in un prossimo futuro la ricerca nel settore edile possa ovviare a questa lacuna.

## 4. Costruzioni in calcestruzzo

---

<b>4.1</b>	<b>In generale</b>	<b>46</b>
------------	--------------------	-----------

---

<b>4.2</b>	<b>Struttura dei sistemi di protezione</b>	<b>47</b>
------------	--	-----------

---

<b>4.3</b>	<b>Meccanismi di invecchiamento e danneggiamento</b>	<b>51</b>
4.3.1	In generale	51
4.3.2	Meccanismi e rischi di corrosione	51

---

<b>4.4</b>	<b>Riparazione del calcestruzzo e dell'armatura</b>	<b>54</b>
4.4.1	In generale	54
4.4.2	Principi per la protezione e la riparazione di calcestruzzo	58
4.4.3	Principi per la protezione dell'armatura contro la corrosione	59
4.4.4	Sottofondo del calcestruzzo e condizioni climatiche	70
4.4.5	Trattamento preliminare dell'armatura	76
4.4.6	Calcestruzzo e malta per la riparazione	77
4.4.7	Sistemi di protezione per le superfici	78
4.4.8	Riempimento delle fessure	80

---

<b>4.5</b>	<b>Sistemi di impermeabilizzazione</b>	<b>80</b>
4.5.1	In generale	80
4.5.2	Tipi di sistemi di impermeabilizzazione, norme e direttive	81
4.5.3	Resistenza e durata di vita	87
4.5.4	Controllo e manutenzione	93
4.5.5	Sostituzione	100

---

## 4. Costruzioni in calcestruzzo

### 4.1 In generale

Per **costruzioni in calcestruzzo** si intendono soprattutto opere in **cemento armato**. Le stesse vengono costruite sin dalla fine del 19.mo secolo anche in Svizzera (figura 4.1).

Agli inizi degli anni quaranta è stato introdotto anche il tipo di costruzione in **cemento armato pre-compresso**, utilizzato in primo luogo per i ponti più piccoli delle FFS. Nell'ambito della costruzione della rete delle strade nazionali sono stati realizzati una molteplicità di ponti in cemento armato precompresso.

Rispetto al volume costruito che necessita attualmente di interventi di manutenzione, le costruzioni in cemento armato rappresentano sicuramente la quota maggiore.

Come illustrato nel cap. 1.4 il tipo di costruzione in cemento armato viene utilizzato, oltre che per la costruzione di ponti, anche per molte altre opere di infrastruttura e di carattere civile.

La **conservazione delle costruzioni in calcestruzzo** è una tematica molto diffusa nella letteratura specifica, nelle pubblicazioni tecniche ed è trattata in giornate di studio e corsi di formazione. Gli specialisti del settore sono addirittura sommersi da informazioni. A causa dell'enorme quantità di prodotti e procedure, la qualità dell'offerta è molto differenziata ed è quindi difficile districarsi con cognizione di causa.

Nel corso degli anni sono stati sviluppati dei tipi di sistemi di protezione molto differenti l'uno dall'altro e per l'ingegnere progettista non è sempre facile scegliere la soluzione più idonea. Nel capitolo 3 vengono illustrate le principali regole a questo riguardo.

Mentre gli sforzi per evitare o ridurre al minimo i problemi **causati dai giunti** nelle nuove opere attraverso **costruzioni monolitiche** sono considerevoli, per le opere esistenti i problemi rimangono in misura consistente. Oltre ai problemi specifici riferiti ai raccordi terminali ed alle infiltrazioni, i giunti rappresentano un punto particolarmente delicato riguardante l'impermeabilità e la resistenza [3.1].

Anche e soprattutto per ciò che riguarda le costruzioni in calcestruzzo è importante osservare come le stesse devono essere **risanate in modo accurato**. Ciò vale anche per le tecniche di ricerca distruttive utilizzate attualmente. Purtroppo l'applicazione non a regola d'arte di questi procedimenti, può causare **più danni che vantaggi**. È in ogni caso necessario chiarire se il provvedimento previsto non provochi effetti troppo devastanti o se lo stesso può, eventualmente, essere sostituito con uno più «morbido».



Figura 4.1 Primo ponte in cemento armato in Svizzera costruito nel 1890 sopra un canale di servizio di una fabbrica a Wildegg [4.1].



Figura 4.2. Ponte-Weinland sopra il Thurtal a Andelfingen, messo in esercizio nel 1958.

## 4.2 Strutture dei sistemi di protezione

Le esigenze principali da soddisfare da parte di un sistema di protezione sono già state trattate nei capitoli 2 e 3. Riassumendo sottolineiamo comunque ancora che il cemento armato è una struttura composita nella quale, a seconda del tipo degli influenti, deve essere protetto sia il calcestruzzo che l'armatura:

- **protezione del calcestruzzo** contro influenti meccanici (ad es. abrasione), influenti chimici (ad es. acque solfatiche) influenti fisici (ad es. gelo).
- **Protezione dell'armatura** contro la corrosione (ad es. causata dal sale antigelo).

Una delle caratteristiche della costruzione in calcestruzzo è la protezione dell'armatura a seguito dell'ambiente alcalino del calcestruzzo. Questa condizione si verifica soltanto se, ad es., è presente una copertura sufficiente in cemento, se lo stesso è resistente anche agli influenti esistenti e se si è in presenza di un grado di alcalinità sufficiente. Sia per progetti nuovi che per le riparazioni del calcestruzzo devono essere **strettamente osservate e rispettate rigorosamente le esigenze di qualità soprattutto in relazione ai criteri di durevolezza**. Le indicazioni che seguono su normative rappresentano sicuramente una base per il rispetto di questi importanti criteri; comunque nella prassi **non sono sufficienti** per la produzione di un calcestruzzo durevole.

Nel nostro paese, negli ultimi anni sono stati moltiplicati i lavori di ricerca sulla durevolezza del cemento armato.

- Copertura in cemento necessaria:
    - norma SIA 162 (1989): cpv. 4 32 o, se presenti
    - direttive del committente
  - esigenze poste nei confronti dell'idoneità d'uso, rispettivamente della durevolezza riferita all'impermeabilità, resistenza al gelo, al sale antigelo, agli influenti chimici (ad es. acque dannose per il cemento), all'abrasione:
    - norma SIA 162 (1989) e 162/1 (1989): cpv. 5 1

In base ai controlli delle costruzioni, degli esperimenti di laboratorio ed analisi teoriche, oltre che allo studio della bibliografia punto [4.2], sono stati elaborati i suggerimenti di come sia, da un lato, possibile raggiungere l'obiettivo di avere una struttura portante in cemento armato durevole, e dall'altro, di come valutare la condizione di una struttura portante esistente.

È stato accertato che la **compattezza** e lo spessore dello strato di copertura dell'armatura hanno un'importanza decisiva per la durevolezza. La compattezza viene determinata dalla **porosità** e dalle **fessure** esistenti. Oltre ad una **corretta progettazione dei dettagli costruttivi**, è soprattutto **la tecnologia altamente qualificata nel settore del calcestruzzo**, che garantisce una compattezza sufficiente (tabella 4.1). Si può, tra l'altro, segnalare **il mantenimento di un valore W/Z di 0.45 - 0.55** nel calcestruzzo da costruzione usuale ed un trattamento successivo dello stesso corrispondente alle esigenze.

Compattezza del calcestruzzo	Provvedimenti
Porosità	valore W/Z (calcestruzzo di copertura e rivestito)  trattamento supplementare (calcestruzzo di copertura)  di tipo costruttivo (calcestruzzo di copertura e rivestito)
Fessure	trattamento supplementare (ritiro $\Delta T$ )  armatura minima (forzature)  di tipo costruttivo

Figura 4.1 Provvedimenti per influenzare la compattezza del calcestruzzo [4.2].

Anche se nella prassi si notano alcuni progressi, di regola, il trattamento supplementare è ancora insufficiente. Lo scopo principale dello stesso è di impedire l'essiccazione troppo veloce del calcestruzzo di copertura che produrrebbe la diminuzione del gradiente termico a causa del calore d'idratazione dell'elemento costruttivo. Ciò provocherebbe, tra l'altro, la formazione di incrinature da ritiro e, a causa della carenza d'acqua, un'interruzione del processo di idratazione determinando la porosità dello strato di copertura.

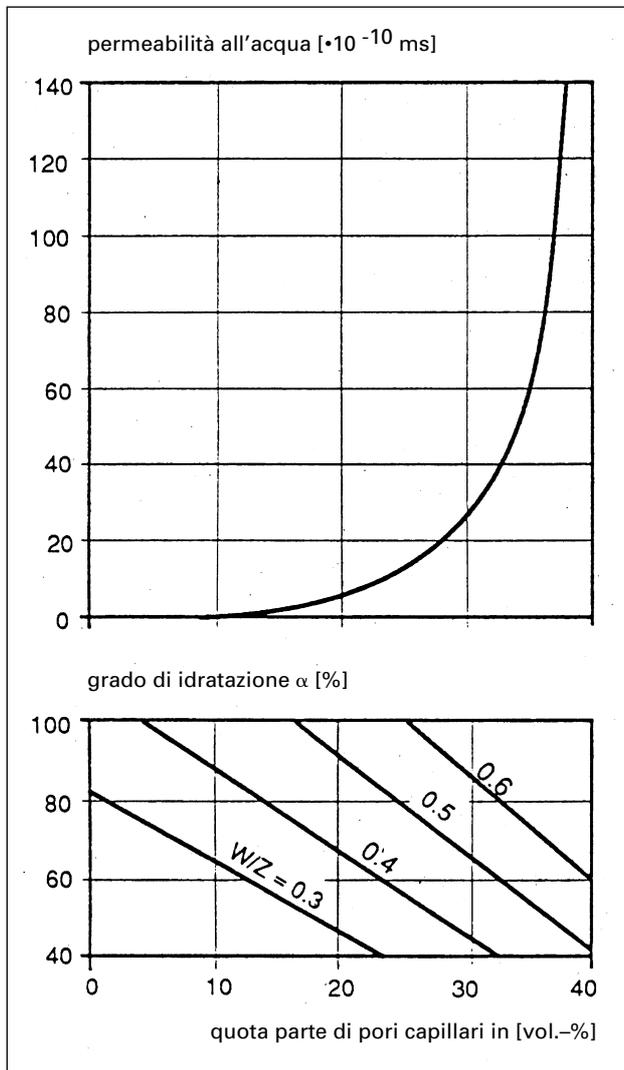


Figura 4.2. L'influsso del grado d'idratazione e del valore W/Z sulla permeabilità di un blocchetto di cemento [4.2].

Nella figura 4.2 è riportata, come indicatore della compattezza, la permeabilità ed il relativo contenuto della quota di capillarità in rapporto al grado d'idratazione ed al valore W/Z. È visibile l'aumento della permeabilità nel caso di un grado d'idratazione ridotto.

La figura 4.3 mostra chiaramente il forte aumento della diffusione di ossigeno, quando il trattamento supplementare ha una durata inferiore ai 7 giorni.

Nei punti [4.3] e [4.4] (bibliografia) vengono indicati i vantaggi del cosiddetto calcestruzzo ad alto rendimento. In futuro il concetto «calcestruzzo ad alto rendimento» dovrà essere ulteriormente precisato. L'obiettivo consiste nel miglioramento delle caratteristiche di resistenza e della durevolezza attraverso una scelta idonea delle componenti usuali, l'utilizzo di additivi (ad es. per la liquefazione) e di materiali inerti (ad es. polvere di silice) con conseguente contenimento dei fattori W/Z al disotto dei valori 0.4. Sia le ricerche che l'applicazione pratica dimostrano, che l'utilizzo di questo calcestruzzo è idoneo ed opportuno per elementi costruttivi particolarmente sollecitati da aggressioni del gelo e dei sali antigelo nelle zone soggette a spruzzi d'acqua.

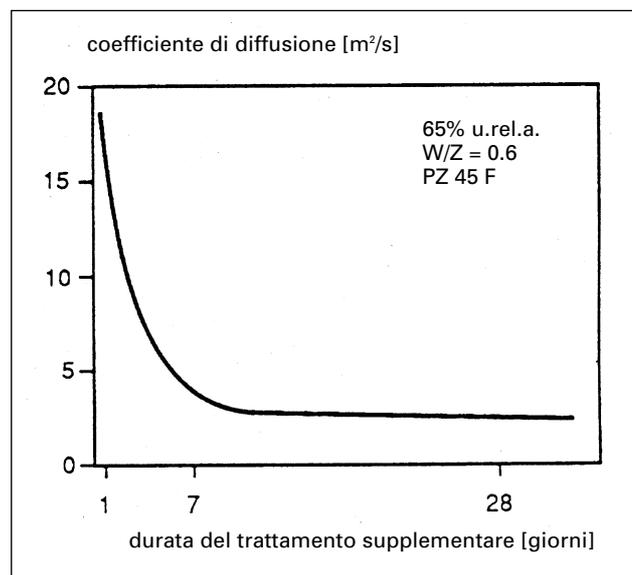


Figura 4.3. Influsso sulla porosità della durata del trattamento supplementare [4.2 [4.5].

In [4.4] sono raggruppati i risultati dei controlli effettuati su 82 ponti in calcestruzzo fresco nel Ticino. È stato dimostrato che anche un fattore W/Z basso può dare un calcestruzzo lavorabile. Si deve comunque considerare con molta cautela l'eventuale adozione generalizzata di valori W/Z ancora più bassi, anche se esiste la possibilità, con valori di 0.35 o inferiori, di migliorare alcune caratteristiche specifiche. Ciò determinerebbe comunque anche importanti svantaggi come ad es. una pessima possibilità di lavorazione (tra l'altro con la formazione di cavità di ghiaia), un aumento del pericolo di formazione di fessure, condizioni di fragilità e per finire, maggiori costi. Queste osservazioni sulla tematica del calcestruzzo durevole dimostrano **che il tipo di costru-**

**zione in cemento armato dispone di una buona capacità di autoprotezione del materiale medesimo.** Nella costruzione di nuove opere è assolutamente necessario osservare in modo ottimale le condizioni quadro sia nella fase di progettazione che in quella dell'esecuzione. **Un sistema di protezione supplementare sarà quindi necessario soltanto in casi particolari.**

Per contro, **nelle costruzioni in calcestruzzo esistenti** ci si trova spesso confrontati con **strati di copertura in calcestruzzo qualitativamente insufficienti.** Ciò provocherà, presto o tardi, a seconda dell'influsso e dell'esposizione dell'elemento costruttivo, l'insorgere di danni al calcestruzzo od all'armatura (figura 4.4.)

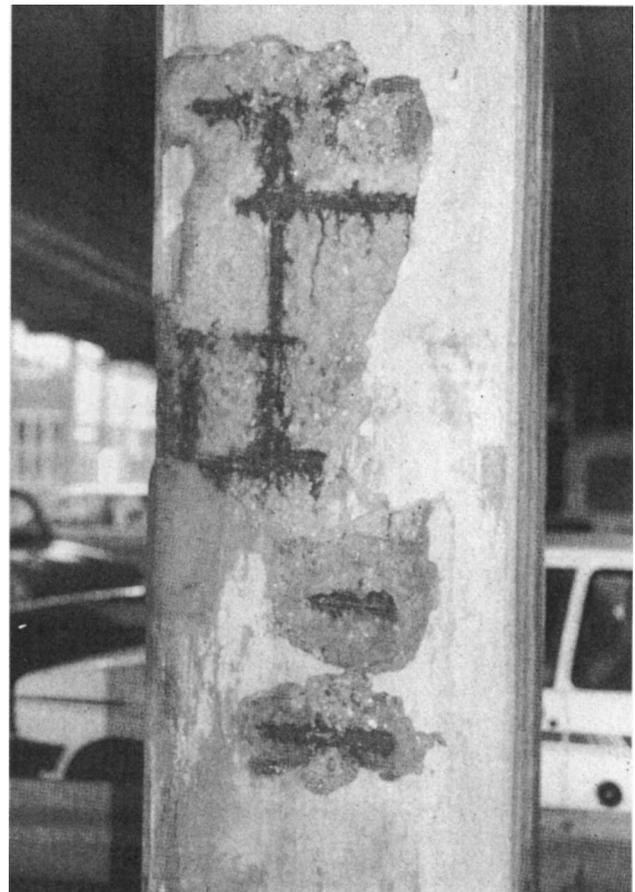


Figura 4.4. Danneggiamento del tondino per cemento armato causato dalla corrosione, due immagini che dimostrano il danno [4.7].

Nella tabella 4.2 è rappresentata un'articolazione dei sistemi di autoprotezione del materiale da costruzione, delle protezioni supplementari e delle procedure.

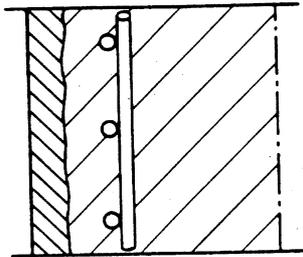
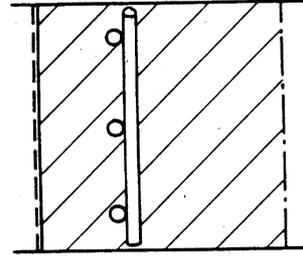
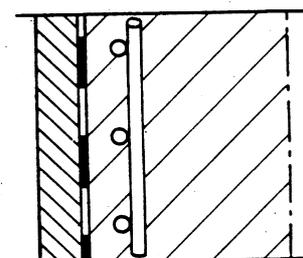
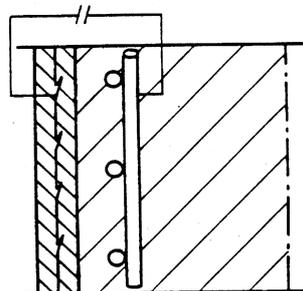
<b>Categorie di sistemi di protezione</b>	
<b>Sistemi di autoprotezione del materiale da costruzione</b>	<p>Calcestruzzo e malta</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- calcestruzzo</li> <li>- malta</li> <li>- calcestruzzo a proiezione</li> </ul> 
<b>Sistemi di protezione e procedure supplementari</b>	<p>Protezione delle superfici:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- impregnazione idrofobizzante</li> <li>- sigillatura</li> <li>- rivestimenti</li> <li>- coperture (ad es. lastre in ceramica)</li> <li>- ecc.</li> </ul> 
	<p>Impermeabilizzazione:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- teli d'impermeabilizzazione</li> <li>- materiale sintetico liquido</li> <li>- impermeabilizzazione a mastice</li> <li>- impermeabilizzazione combinata con cemento</li> <li>- ecc.</li> </ul> 
	<p>Procedimenti elettro-chimici</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- protezione catodica contro la corrosione (estrazione di cloruro)</li> <li>- (rialcalinizzazione)</li> </ul> 

Tabella 4.2 Articolazione dei sistemi di protezione per le riparazioni; i sistemi di protezione supplementari vengono utilizzati anche nelle nuove costruzioni. A seconda del caso i sistemi di protezione devono essere completati con iniezioni delle fessure.

## 4.3 Meccanismi di invecchiamento e danneggiamento

### 4.3.1 In generale

Dire che il cemento armato è composto di calcestruzzo ed armatura è un'affermazione piuttosto riduttiva. La stessa significa che si ha a che fare con una struttura composita la cui durevolezza dipende dalle caratteristiche delle singole componenti e dalle interazioni reciproche.

Non va inoltre dimenticato, che lo stesso calcestruzzo è un materiale composito fatto di cemento, materiale inerte, acqua d'impasto e aggiuntivi (additivo del calcestruzzo, materiale aggiuntivo). Nel cap. 2.3 sono illustrate le problematiche generali sull'invecchiamento ed il danneggiamento e sull'importanza della distinzione tra influssi o carichi **esterni** ed **interni**. Riferito al cemento armato ciò significa che le diverse componenti possono subire danneggiamenti od invecchiamenti a dipendenza degli influssi/carichi esterni ed interni. Siccome si tratta di una struttura composita è inoltre importante che le diverse componenti, da svariati punti di vista, siano reciprocamente compatibili. Per ulteriori informazioni riguardanti la composizione ed il comportamento delle componenti del cemento armato, si rimanda alla letteratura specialistica (ad es. riferita al calcestruzzo [4.8]).

Se in questa sede sono trattate essenzialmente le problematiche del **danneggiamento dell'armatura dovuto a corrosione**, è perchè le ricerche hanno messo in evidenza che la stessa rappresenta una delle **parti più importanti dal punto di vista dei costi**. Contemporaneamente non vanno comunque dimenticate le diverse categorie di danni causati al calcestruzzo dal gelo, dal sale antigelo, dalle acque aggressive e dalle reazioni alcaline. In considerazione del fatto che qualora si dovesse approfondire questo argomento lo spazio disponibile in questa sede non sarebbe sufficiente, si rimanda, per ulteriori approfondimenti, alla letteratura specialistica (ad es. [4.7]).

La tematica relativa alla corrosione viene trattata da noi ingegneri civili con un senso di disagio; e ciò soprattutto perchè abbiamo una certa difficoltà nel familiarizzare con i procedimenti elettrochimici che stanno alla base della corrosione. È comunque necessario conoscere alcune condizioni di base importanti. A questo proposito esiste una letteratura comprensibile anche per specialisti che non si occupano specificamente di corrosioni [4.6, 4.7].

### 4.3.2 Meccanismi e rischi di corrosione

Uno dei presupposti essenziali per l'efficienza del cemento armato consiste nella protezione dello stesso da parte del calcestruzzo esterno medesimo. L'eventuale insorgenza della corrosione presuppone tre condizioni (vedi figura 4.9):

- deve essere presente un'elettrolita
- l'efficacia dello strato passivo deve essere annullato e
- l'ossigeno deve essere penetrato fino all'acciaio

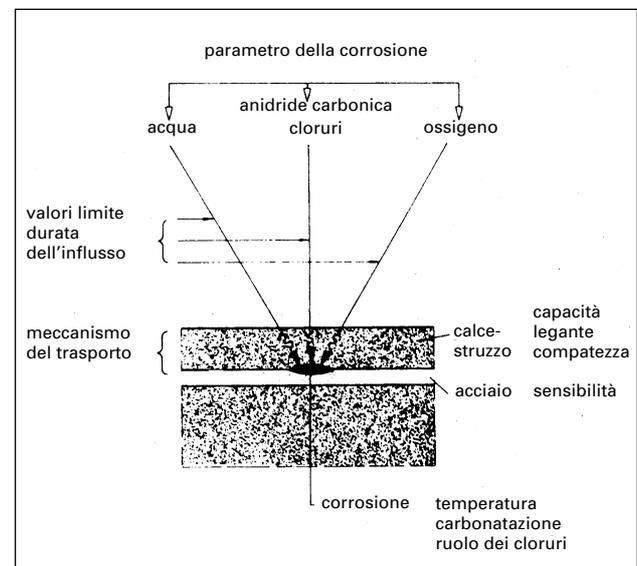


Figura 4.9 Influssi che determinano la corrosione dell'armatura nel calcestruzzo [4.7].

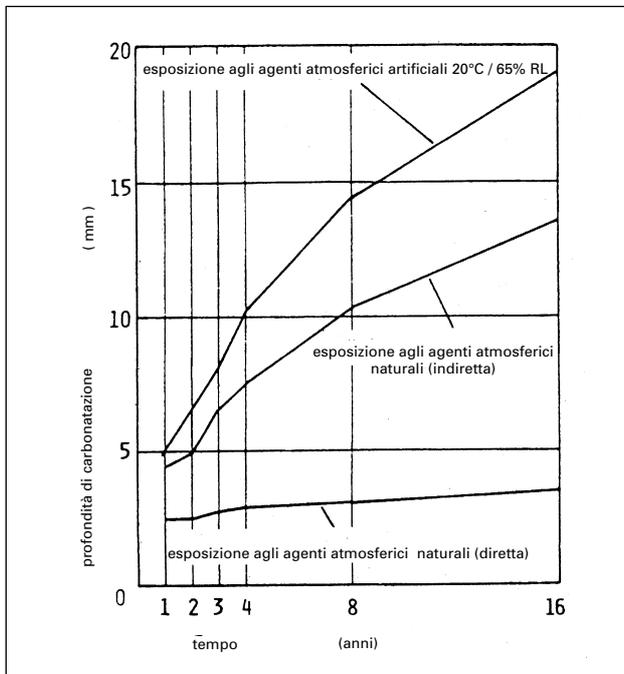
#### Formazione di elettroliti [4.7]:

Il primo presupposto citato è adempiuto quando il calcestruzzo è umido. Tenuto conto che l'umidità penetra nel calcestruzzo anche mediante condensazione di vapore acqueo dall'aria (condensazione capillare), per l'umidificazione del calcestruzzo non deve necessariamente essere presente dell'acqua in forma liquida. Comunque l'umidità dell'aria dei vani interni è di regola insufficiente per la formazione di elettroliti. All'aperto, per contro, la quantità di umidità è sufficiente per generare un elettrolita nel calcestruzzo. Il contenuto proprio di umidità del calcestruzzo varierà a seconda delle condizioni atmosferiche.

**Perdita della passivazione, secondo [4.7]:**

Lo strato passivo sulla superficie dell'acciaio può essere

- soppresso mediante la carbonatazione del calcestruzzo (figura 4.10) oppure
- sfaldato mediante la presenza di sostanze che favoriscono la corrosione, ad es. di cloruri (figura 4.11).

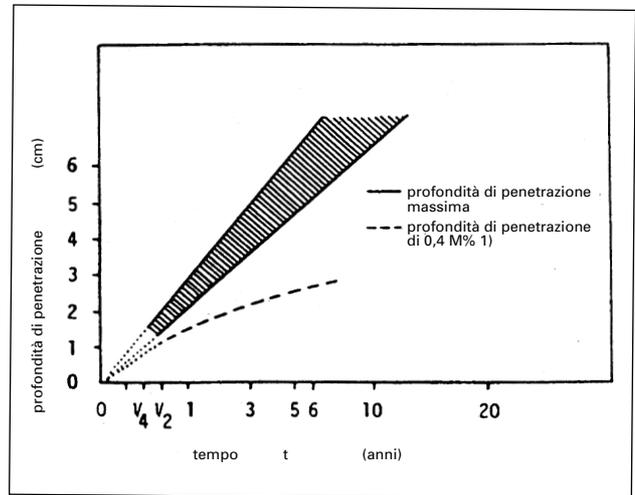


**Figura 4.10** Profondità della carbonatazione in funzione della durata con diverse condizioni di esposizione agli agenti atmosferici; [4.6] diretto: esposizione alla pioggia indiretto: al coperto  
*Osservazione: i risultati illustrati nel diagramma sono da intendersi come esempio; nella prassi possono verificarsi delle variazioni nelle due direzioni; sia relativamente al decorso che alla profondità della carbonatazione.*

Nel primo caso la corrosione possibile può essere definita «corrosione da carbonatazione» mentre nel secondo caso si tratta di «corrosione da cloruro», se il fattore scatenante è considerato come criterio distintivo. Nella carbonatazione il CO<sub>2</sub> pre-

sente nell'aria reagisce con l'idrato di calcio del calcestruzzo trasformandosi in carbonato di calcio. Contemporaneamente viene liberata acqua.

Come sostanze corrosive sono da segnalare, oltre ai cloruri, anche i composti di zolfo e soprattutto i solfati. Il ruolo dei cloruri nella corrosione è trattato in modo più esteso in quanto rappresentano la quota più rilevante dei danni da corrosione riscontrati sull'acciaio. Per ciò che concerne l'importanza dei solfati si rimanda alla bibliografia che tratta più diffusamente questa tematica ad es. [4.8].



**Figura 4.11** Profondità di penetrazione dei cloruro in funzione al tempo [4.3].  
*Osservazione: i risultati illustrati nel diagramma sono da intendersi come esempi; nella prassi possono verificarsi delle variazioni nelle due direzioni, sia relativamente al decorso che alla profondità di carbonatazione.*  
 1) Questo dato è riferito alla quota % dei cloruri sulla massa di cemento.

**Ossigeno, secondo [4.7]:**

Gli effetti provocati dall'ossigeno e dall'anidride carbonica sono differenti. Tenuto conto che durante la penetrazione nel calcestruzzo l'anidride carbonica viene legata, la velocità di penetrazione del fronte di carbonatazione dipende anche dalle quantità di CO<sub>2</sub> addotta. Non sussistono, per contro, simili presupposti per ciò che concerne l'ossigeno.

La sua velocità di diffusione dipende essenzialmente dalla compattezza e dal contenuto in umidità della struttura. Per questo motivo l'ossigeno può avanzare più velocemente fino a raggiungere la superficie dell'acciaio sia sotto forma di gas sia sciolto in acqua che non il fronte della carbonatazione. Le misurazioni del contenuto di ossigeno della superficie dell'acciaio sono oltremodo difficili. I provvedimenti per la diminuzione del contenuto di ossigeno dell'acciaio, ad es. con dei rivestimenti, sono interessanti soltanto quando la corrosione non può essere fermata attraverso l'eliminazione di altri fattori di corrosione.

Affinchè possa manifestarsi la corrosione sulla superficie dell'acciaio, è necessario che l'acqua, l'ossigeno ed i cloruri, rispettivamente il fronte della carbonatazione, siano penetrati nel calcestruzzo fino a raggiungere le componenti in acciaio. Le condizioni ottimali di penetrazione dipendono da diversi fattori. Mentre un alto contenuto d'acqua ostacola in modo crescente la penetrazione di ossigeno ed anidride carbonica, la penetrazione di sostanze corrosive, come  $\text{Cl}^-$ , è incentivata. In caso di un minimo contenuto d'acqua, l'ossigeno può penetrare con più facilità ma contemporaneamente viene impedita la reazione della carbonatazione, perchè la stessa necessita di condizioni di umidità. La maggiore carbonatazione si ha con un contenuto d'acqua nel calcestruzzo che corrisponde ad un'umidità relativa dell'aria situata tra il 40% ed il 60%. Con un simile tasso d'umidità il contenuto d'acqua nel calcestruzzo è generalmente insufficiente per la formazione di elettroliti e la corrosione non si verifica. Questa correlazione è illustrata schematicamente nella figura 4.12. La stessa dimostra che in condizioni costanti di stratificazione le condizioni ottimali per una corrosione sono presenti solo in un ambito molto limitato. Al di fuori della stessa la corrosione non si verifica del tutto o soltanto molto lentamente. Così, ad es., nei vani interni secchi non c'è pericolo di corrosione nonostante un tasso di carbonatazione relativamente elevato.

Per la valutazione del **rischio di corrosione** oltre ai fattori menzionati nel cap. 4.2 come **lo spessore e la compattezza dello strato di copertura del calcestruzzo** ed i parametri di corrosione illustrati in precedenza, sono necessari ulteriori informazioni sui fattori di rischio che causano o sviluppano la corrosione. Indicazioni a questo proposito sono contenute nella figura 4.12 e nelle osservazioni seguenti [4.9]:

– **Cloruri:** nel calcestruzzo completamente alcalino esiste il rischio di corrosione dell'armatura,

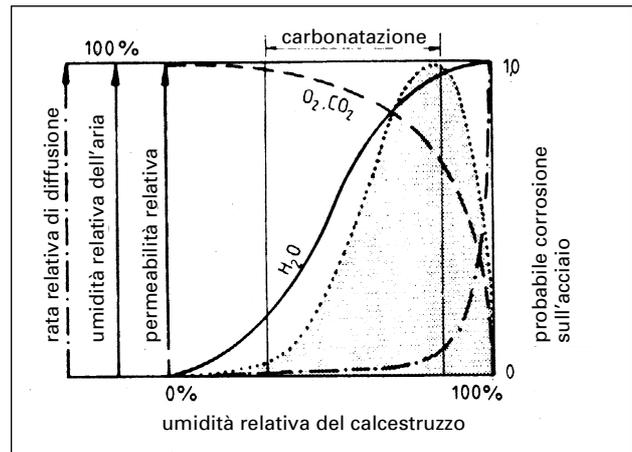


Figura 4.12 L'interazione dei parametri di corrosione [4.7].

quando la concentrazione di cloruro rispetto alla massa di cemento, è di  $> 0,4\% \text{Cl}^-$ . Con l'ausilio di carote è possibile rilevare un profilo della profondità di penetrazione del cloruro, con una prospezione sulle zone ritenute soggette a pericolo imminente oppure solo minacciate oppure ancora i settori sicuri dell'armatura.

- **Inumidificazione:** mediante controlli visivi o misurazioni della resistenza elettrica del calcestruzzo, è possibile individuare le zone con dei tassi di umidità troppo elevati. Particolare attenzione deve essere rivolta all'**esposizione dell'elemento costruttivo**, perchè soprattutto la variabilità inumidificazione/essiccazione del calcestruzzo aumenta fortemente il rischio di corrosione (in particolare se si è in presenza di cloruri).
- **Carbonatazione:** nel caso in cui le componenti in acciaio sono a contatto con calcestruzzo carbonatizzato, cioè non sufficientemente alcalino, il rischio di una corrosione è importante. Ciò si verifica comunque soltanto nel caso in cui siano presenti ulteriori fattori di corrosione. La durata della penetrazione (e quindi il momento in cui si manifesta un pericolo acuto di corrosione) **non può assolutamente** essere prevista soltanto con l'ausilio dei parametri del calcestruzzo (ad es. il fattore  $W/Z$ ) o secondo una regola generale. Le condizioni di esposizione dell'elemento costruttivo (esposizione agli agenti atmosferici, protetto dalla pioggia, ecc.), sono altrettanto importanti.

In base al rilevamento sperimentale dello stato di corrosione dell'armatura, delle conoscenze sui fattori di rischio e loro interazione come pure le condizioni d'uso attuali e future previste dell'opera, è possibile valutare il rischio di corrosione. Nella tabella 4.3 sono illustrati, in base ad una suddivisione molto generica, alcuni casi tipici. Nel calcestruzzo contenente cloruro e non carbonatizzato l'aggressione corrosiva si sviluppa quasi sempre nella forma di una corrosione profonda. Una copertura dell'armatura secondo la norma ed un calcestruzzo compatto ostacolano fortemente la penetrazione di sostanze nocive e quindi l'insorgere della corrosione medesima [4.2 e 4.10].

età della costruzione	carbonatazione	esposizione 1)	contenuto di cloruri nell'armatura			
			< 0,1 %	~ 0,5 %	> 1 %	
			calcestruzzo completamente alcalico	molto bagnato	-	-
calcestruzzo compatto grande copertura	carbonatato fino all'armatura	secco	-	-	+	
		umido	-	+	++	
		variabile	-	++	+++	
età della costruzione	carbonatazione <td rowspan="4">esposizione 1) <td>molto bagnato</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </td>	esposizione 1) <td>molto bagnato</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td>	molto bagnato	-	-	-
			secco	-	+	++
			umido	+	++	+++
			variabile	++	+++	+++

Tabella 4.13 Prevedibile rischio di corrosione (rispettivamente possibile insorgere sul tondino per cemento armato nel calcestruzzo in funzione di diversi gradi di influenza [4.9]:

- minimo
- + da rilevante a grande
- ++ molto grande
- +++ corrosione continua

1) Queste indicazioni sono riferite alla quota % dei cloruri rispetto alla massa di cemento.

## 4.4 Riparazione del calcestruzzo e dell'armatura

### 4.4.1 In generale

Quali sono gli obiettivi delle riparazione?

I provvedimenti di riparazione servono per ripristinare o aumentare la capacità di resistenza delle strutture portanti in calcestruzzo contro influssi esistenti. Si può citare, ad es., la sostituzione del calcestruzzo contaminato da cloruro con calcestruzzo e malta. Se l'armatura è corrosa si tratta di ripristinare una protezione sufficiente contro la corrosione. Per evitare problemi di sicurezza della portata, l'armatura molto danneggiata deve, se del caso, essere sostituita.

Sono possibili i provvedimenti particolari seguenti [4.11]:

- **riempimento di fessure** (figura 4.15)  
Il riempimento di fessure serve, a seconda dello stato auspicato, all'impermeabilizzazione di elementi costruttivi, ad impedire la penetrazione di materiali corrosivi, per il ripristino di un assetto monolitico degli elementi costruttivi o, in casi particolari, anche per la protezione dell'armatura contro la corrosione.

- **Riempimento di punti difettosi localmente circoscritti** (figura 4.16)

Questo provvedimento serve per il ripristino della superficie originale dell'elemento costruttivo (riprofilatura). Lo stesso può essere ritenuto sufficiente soltanto nel caso in cui il danno non sia stato causato da armature corrose. L'applicazione viene eseguita a mano con calcestruzzo gettato in opera nell'armatura o, nel caso in cui siano necessarie grandi quantità, anche mediante iniezioni.

Di solito vengono utilizzati malte di cemento e calcestruzzi con o senza modifica del materiale sintetico aggiuntivo come pure, ma solo in casi eccezionali, malta combinata con resina reattiva o calcestruzzi.

- **Applicazione estesa di malta e calcestruzzo** (figura 4.17)

Questo provvedimento serve ad es. per l'ampliamento della copertura in calcestruzzo dell'armatura, per eseguire un nuovo profilo della superficie o per rafforzare la sezione trasversale del calcestruzzo. L'applicazione viene di regola eseguita con calcestruzzo gettato in opera (in caso di superfici non orizzontali in armatura) o con calcestruzzo a proiezione (ad es. sulle pareti, appoggi ed intradossi).

Di solito si utilizzano malte di cemento o calcestruzzi con o senza modifica del materiale sintetico. Per un'applicazione estesa della malta e del calcestruzzo in modo da aumentarne la resistenza contro aggressioni meccaniche e chimiche possono essere utilizzati anche sistemi con resina reattiva.

– **Applicazione di impregnazioni idrofobizzate (impermeabilizzanti)** (figura 4.18)

Come provvedimento specifico le impregnazioni impermeabilizzanti impediscono l'assorbimento capillare di acqua incluso il relativo trasporto delle sostanze nocive. Le stesse vengono utilizzate anche per migliorare l'aderenza a lungo termine di coperture formanti strati sul fondo. Contemporaneamente i prodotti devono essere resi compatibili tra di loro.

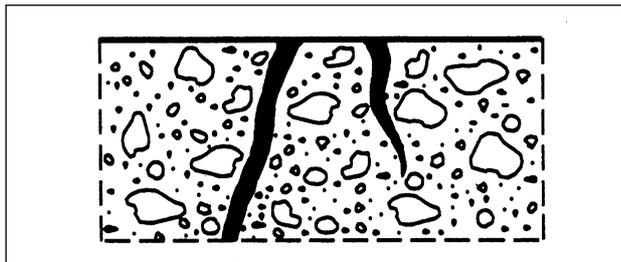


Figura 4.15 Riempimento di fessure con resine reattive o pasta di cemento.  
L'armatura non è illustrata.

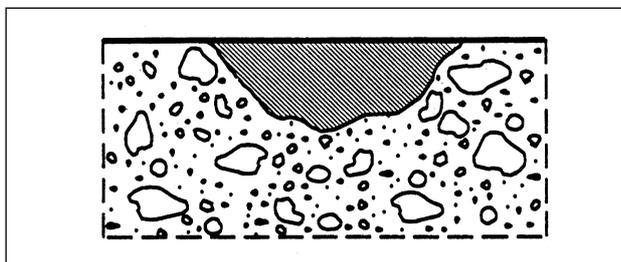


Figura 4.16 Riempimento di punti localmente difettosi con malta o calcestruzzo.  
L'armatura non è illustrata.

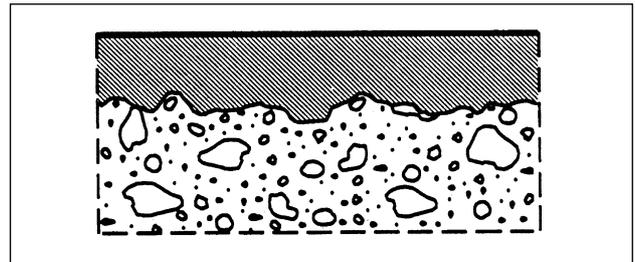


Figura 4.17 Applicazione estesa di malta e calcestruzzo.  
L'armatura non è illustrata.

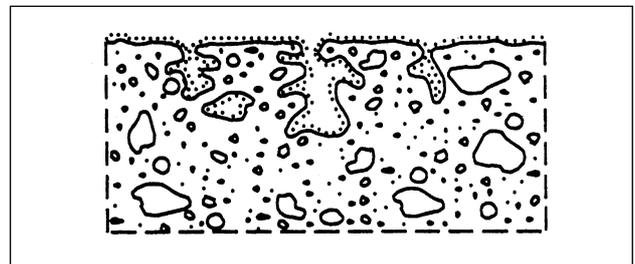


Figura 4.18 Applicazione di impregnazioni idrofobizzanti.  
L'armatura non è illustrata.

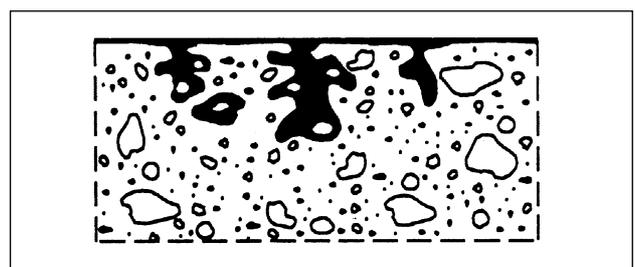


Figura 4.19 Applicazione di impregnazioni (in parte formanti pellicole).  
L'armatura non è illustrata.

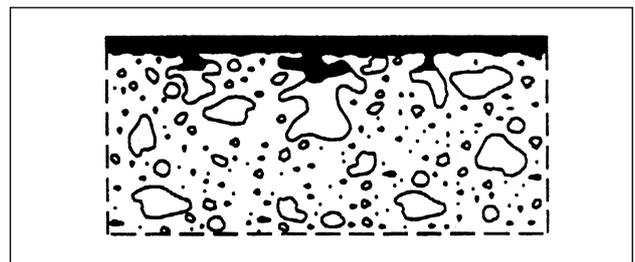


Figura 4.20 Applicazione di rivestimenti formanti pellicole.  
L'armatura non è illustrata.

– **Applicazione di impregnazione o rivestimenti formanti pellicole** (figure 4.19 e 4.20)

Questa misura serve ad impedire la penetrazione di materiali liquidi o gassosi nel calcestruzzo (per l'ossigeno l'efficacia è relativa). La stessa può servire anche come mano di fondo, ad es. con l'obiettivo di migliorare la resistenza del sottofondo o l'adesività verso lo strato successivo. Di regola, sono utilizzati sistemi combinati di materie sintetiche.

La descrizione dei provvedimenti specifici dimostra la molteplicità delle possibilità di riparazione. A questi vanno aggiunte le **procedure elettrochimiche** e le **impermeabilizzazioni** che vengono trattate nei capitoli che seguono. Per ognuna delle misure illustrate vengono offerti i più svariati prodotti.

**Come è possibile scegliere, in pratica, le misure ed i prodotti idonei?**

Per l'ingegnere progettista sono importanti le **indicazioni di principio per la protezione e la riparazione del calcestruzzo e per la protezione dei tondini per cemento armato contro la corrosione**. Per la valutazione, ad es. delle superfici (tra l'altro dell'idoneità di un sottofondo in calcestruzzo per un nuovo rivestimento) e di prodotti per il risanamento, sono necessarie conoscenze sulle **grandezze fisiche e chimiche** orientative; argomento che sarà trattato nei capitoli seguenti. È inoltre necessario conoscere il comportamento, nel tempo, di queste procedure e prodotti e cioè di quando sia la loro durata di vita a determinate condizioni.

Ricerche su queste problematiche sono condotte in diversi paesi. In base al confronto dei risultati disponiamo di molte conoscenze ma a tutt'oggi molte domande sono senza risposta.

Questa situazione è messa in chiara evidenza dal rapporto di ricerca «protezione e risanamento di costruzioni in cemento armato nel settore delle costruzioni stradali» di Böhni e a. [4.12] dove sono illustrati i risultati di confronto delle ricerche su diversi prodotti. Le esperienze acquisite con rivestimenti usuali sono riassunte qui di seguito:

«i rivestimenti di protezione maggiormente utilizzati sono articolati, in modo semplificato, nei tipi descritti di seguito. Le più importanti osservazioni fatte negli ultimi anni su questi tipi di rivestimento, possono essere riassunte, senza pretendere di essere esaurienti, come segue:

**i rivestimenti in dispersione epossidica relativamente sottili e con una buona adesività**

non hanno dato buoni risultati soprattutto per quanto riguarda la protezione contro il sale antigelo. Gli stessi sono fragili e non sono di conseguenza nemmeno in grado di ricoprire le fessure sottili. Nonostante il rivestimento protettivo si possono sovente constatare i tipici danni da gelo sulle superfici in calcestruzzo. Ciò è messo in rilievo dai molteplici punti difettosi nel rivestimento con una chiusura insufficiente dei pori che non può essere evitata al momento dell'applicazione del calcestruzzo sulla superficie porosa.

Ricerche effettuate di recente sul calcestruzzo sotto il rivestimento della galleria mostrano contenuti di cloruro in parte molto elevati. Questi risultati rimettono ulteriormente in questione l'efficacia della protezione con rivestimenti sottili.

I rivestimenti in **materiale sintetico bonificato e combinati con cemento** vengono applicati con uno spessore di 2 a 3 millimetri. L'esecuzione è semplice e non presenta problemi anche con un sottofondo umido. Un'umidificazione accurata ed un trattamento successivo del calcestruzzo sono necessari per evitare il pericolo di perdita d'acqua e la formazione di incrinature da ritiro. Questi prodotti possono, in parte, ricoprire le fessure in modo limitato. Nel caso di basse temperatura può manifestarsi una diminuzione importante della capacità di deformazione. Con l'introduzione di tessuti si ottiene un comportamento migliore delle fessure; ciò significa che al posto di una fessura larga si formano diverse fessure sottili.

Finora non si sono riscontrati particolari vantaggi nel caso in cui le fessure sottili non siano ricoperte. In particolare non si sono potute constatare delle spaccature sui margini delle fessure sottili, come nel caso di utilizzo di dispersioni epossidiche, e nemmeno delle infiltrazioni. Questo tipo è inoltre meno sensibile ai danni di natura meccanica (ad es. causati dagli spazzaneve).

**I rivestimenti termoplastici morbidi** possono ricoprire fessure anche in caso di uno spessore minimo degli strati. Anche in tal caso, a seconda del tipo di materiale sintetico utilizzato, si può verificare una diminuzione importante della capacità di deformazione con l'abbassamento della temperatura.

L'applicazione e la riparazione di questi rivestimenti non presenta delle grosse difficoltà, ma si sporcano facilmente e sono soggetti a danni meccanici. L'adesività è piuttosto debole e sussiste il pericolo di infiltrazione di umidità.

**I rivestimenti termoplastici duri** vengono applicati, nella maggior parte dei casi, su una stuccatura di fondo per ridurre la penetrazione di so-

stanze nocive come il CO<sub>2</sub> o il Cl<sup>-</sup> nel calcestruzzo. Gli stessi sono generalmente sottili, fragili e nemmeno in grado di coprire anche le fessure di piccole dimensioni. In alcuni casi si sono verificate delle spellature, la cui origine non è ancora chiarita.

**I rivestimenti elastomeri sottili** (spessore < 0.5 mm) composti da prodotti reticolati a componente singola possono ricoprire solo limitatamente le fessure. Di solito gli stessi necessitano di un'otturazione dei pori. Per raggiungere uno spessore minimo degli strati è necessario più di un processo lavorativo con i relativi tempi d'attesa. La permeabilità al vapore è piuttosto scarsa. Nella prassi, di solito, non si riesce a ricoprire le fessure. I prodotti perdono evidentemente la loro flessibilità, probabilmente a causa dell'invecchiamento o per cause da attribuire alle condizioni di fabbricazione non ottimali. Con uno spessore così ridotto non è possibile garantire uno strato di protezione senza punti difettosi. Esiste inoltre il pericolo di infiltrazione di umidità e dell'insorgenza di danni meccanici.

**I rivestimenti elastomeri spessi** (qui si tratta quasi sempre di poliuretano o termoindurenti elastoplastici nella forma di combinazioni di poliuretano-epossidico). Questi prodotti sono in grado di ricoprire le fessure in movimento anche a basse temperature. Nel caso di applicazione su calcestruzzo umido gli stessi hanno la tendenza a formare delle bolle. Per la protezione contro le radiazioni UV è necessaria un'ulteriore impregnazione. Anche in questo caso esiste il pericolo di infiltrazione a causa della scarsa adesività in particolare quando i dettagli di raccordo sono eseguiti male. A causa dello spessore maggiore dello strato, la distruzione del calcestruzzo sotto il rivestimento è visibile soltanto dopo un certo periodo.

Da alcuni anni in Svizzera vengono eseguiti rivestimenti con **poliestere rinforzato con fibre di vetro**. Il rinforzo avviene tramite un feltro di vetro. Le esperienze fatte finora sono per la maggior parte positive.

**Di fatto non si dispone di una sufficiente esperienza sul lungo periodo per tutti questi prodotti. Nel caso di risanamenti eseguiti tempo fa, il motivo è da ricercare da un lato, nel continuo miglioramento dei prodotti esistenti e nella realizzazione di nuovi e dall'altro, nella insufficiente conoscenza del calcestruzzo.** Un'analisi attendibile è inoltre resa difficoltosa dal fatto che, a causa degli inverni miti degli ultimi anni, gli stimoli per una ricerca sono venuti a mancare. Anche per i risanamenti più re-

centi, con una registrazione sistematica di tutti i dati, non è possibile trarre delle conclusioni definitive.

**Per tutti i tipi di rivestimento un ruolo determinante è da assegnare al trattamento preliminare, allo stato dell'umidità del calcestruzzo ed all'esecuzione dei lavori. Particolare attenzione deve essere prestata alla soluzione dei problemi riguardanti i raccordi.**

**Tenuto conto che sono soprattutto i rivestimenti sottili e facilmente danneggiabili quelli che presentano localmente delle carenze di ermeticità, si rende indispensabile l'impiego di malta per riparazioni e stucco di compensazione resistenti al gelo oppure, meglio ancora, anche al sale antigelo. Inoltre i danni meccanici dovrebbero poter essere riparati in modo semplice ed in tempi brevi.**

La conclusione di questo lavoro di ricerca dimostra in modo chiaro l'insicurezza che ancora esiste sul comportamento dei diversi gruppi di prodotti. Ciò nonostante l'ingegnere progettista è continuamente costretto, nella pratica, a prendere delle decisioni su provvedimenti e prodotti e stabilire le esigenze richieste. Visto che a tutt'oggi, nel nostro Paese, non disponiamo di una vasta regolamentazione, (nel punto [4.26] sono contenute alcune indicazioni), è necessario gettare uno sguardo fuori dalle frontiere per vedere cosa succede in questo ambito nel quadro **dell'armonizzazione europea**. Possiamo aspettarci, sulla base delle disposizioni delle cosiddette **direttive CE sui materiali da costruzione**, che le stesse avranno delle ripercussioni concrete anche sul nostro Paese (vedi cap. 2.1.).

Nell'ambito del **CEN** (Comité Européen de Normalisation) il comitato tecnico TC 104 del gruppo di lavoro 8 che si occupa della «Protection and repair of concrete structures» assieme ad altri sottogruppi, è quello che elabora le direttive per la riparazione di elementi costruttivi in calcestruzzo. Di questi gruppi fanno parte anche esperti svizzeri. Il lavoro è stato avviato con l'obiettivo di determinare le esigenze da porre nei confronti di gruppi di prodotti con i relativi controlli d'idoneità e di qualità. Queste sono le condizioni per l'ottenimento del marchio di conformità CE. Se un prodotto è provvisto di questo marchio, lo stesso può essere liberamente utilizzato in tutti i paesi del mercato interno Europeo. La conclusione di questo lavoro richiederà ancora del tempo.

Nel frattempo è stata pubblicata da parte del Comitato tedesco per il cemento armato (DAfStb), la direttiva per la protezione e la riparazione di elementi di costruzione in calcestruzzo [4.11]. Si è voluto, per la prima volta, tentare di regolamentare questa tematica complessa attraverso una direttiva. È pensabile che parti essenziali della stessa verranno integrate in una norma CEN.

È inoltre noto che diversi produttori, orientati verso il mercato internazionale, sono in procinto di sottoporre i loro prodotti all'esame di base secondo la direttiva DAfStb. Alcuni di questi esami sono già conclusi e i prodotti si trovano sul mercato.

Visto questo stato di cose ci sembra quindi ragionevole integrare questa direttiva nelle spiegazioni che seguono come riferimento importante. La stessa è articolata come segue:

parte 1: regolamentazioni generali e principi di progettazione, agosto 1990

parte 2: progetto di costruzione ed esecuzione, agosto 1990

parte 3: garanzia di qualità ed esecuzione, febbraio 1991

parte 4: condizioni di fornitura e disposizioni standardizzate per l'esecuzione (la pubblicazione avverrà a fine 1991); questa parte contiene le descrizioni dei controlli ed è importante soprattutto per gli Istituti di controllo.

(Beuth, casa editrice GmbH, Berlino 30 e Colonia 1, numero di avviamento 65014)

#### 4.4.2 Principi per la protezione e la riparazione del calcestruzzo

Per l'ingegnere progettista è importante sapere come trasformare gli obiettivi relativi alla protezione ed alla riparazione in esigenze da porre ai prodotti ed alle rispettive procedure.

In vista dell'armonizzazione tecnica europea ed in concordanza con le direttive relative alle nuove norme di costruzione della SIA, il nostro Paese dovrebbe richiedere sistematicamente dei certificati d'idoneità con controlli preliminari o test d'ammissione dei prodotti e delle procedure. **Questi controlli devono permettere di verificare se le seguenti esigenze sono soddisfatte** [4.11]:

- i materiali da costruzione utilizzati e gli elementi costruttivi protetti o riparati, devono resistere agli influssi ambientali ed a quelli dovuti all'uso per un periodo d'utilizzazione adeguato. Il rischio di un'aggressione negli strati più profondi (ad es. a causa di un'infiltrazione) deve essere evitato.
- L'aderenza dei materiali costruttivi di protezione o di riparazione al calcestruzzo, rispettivamente all'acciaio dell'elemento costruttivo nonché l'adesività reciproca dei diversi strati deve essere sufficientemente forte e durevole. La stessa non deve subire una riduzione importante nel corso del tempo ad es. a causa dell'alcalinità del calcestruzzo o dell'umidità.
- I materiali da costruzione per la protezione, rispettivamente per la riparazione, non devono provocare una tensione forzata sul fondo causata da una dilatazione termica, da ritiro o da rigonfiamento, provocando distacchi o la formazione di fessure.
- I materiali da costruzione per la protezione, rispettivamente per la riparazione non devono pregiudicare la protezione contro la corrosione dell'acciaio per armature.
- I prodotti e le procedure devono essere conformi alle esigenze di attività sui cantieri.

A seconda del tipo di prodotti, i controlli devono comprendere le seguenti componenti:

- resistenza (pressione, trazione, abrasione)
- comportamento di deformazione a dipendenza della temperatura e dell'umidità
  - sotto sollecitazione (durata breve, durata lunga)
  - senza sollecitazione (ritiro, rigonfiamento, dilatazione termica)

- permeabilità nei confronti dell'acqua
  - acqua
  - vapore acqueo
  - altri liquidi, gas, ioni
- resistente contro
  - gelo o event. gelo e sale antigelo
  - umidità
  - sostanze nocive in soluzioni acquose o organiche agenti dall'esterno
- alcalinità del blocchetto di cemento
- raggi - UV
- temperatura
- danneggiamenti
- adesività al calcestruzzo e tra i singoli strati
- durezza delle caratteristiche sopramenzionate
- possibilità di riparazione e sostituibilità.

A complemento delle esigenze di prova attitudinale, nell'ambito della progettazione, devono essere esaminati i seguenti punti:

- tramite un rivestimento od un'altra procedura di riparazione non devono essere causate delle condizioni negative fisico-costruttive e chimiche sugli elementi costruttivi da proteggere o da riparare nel calcestruzzo con i danni conseguenti.
- I materiali da costruzione e le procedure di esecuzione previsti devono essere conformi alle caratteristiche del sottofondo. Il trattamento preliminare previsto deve essere tenuto in debita considerazione. Le resistenze a trazione delle superfici necessarie dipendono dal settore d'impiego.
- Prima dell'inizio di importanti lavori di riparazione è necessario esaminare, sull'oggetto medesimo, se tutte le esigenze riguardanti il progetto di riparazione possano essere raggiunte con sicurezza in base alle presenti condizioni di esecuzione.
- I lavori di protezione e di riparazione possono essere eseguiti soltanto se le temperature, l'umidità dell'elemento costruttivo come anche le condizioni atmosferiche rispettano determinati valori limite, stabiliti di regola dal produttore (vedi 4.4.4.2).

#### 4.4.3 Principi per la protezione dell'armatura contro la corrosione

##### 4.4.3.1 In generale

La comprensione dei meccanismi di corrosione descritti nel cap. 4.3 formano la base per la progettazione di provvedimenti di riparazione. Bisogna quindi partire dalla **condizione reale** che deve essere nota in base ad un controllo ed una valutazione tecnica. L'ingegnere progettista deve inoltre determinare, in accordo col committente, lo stato teorico convenuto dopo la riparazione.

Le soluzioni di base od i principi di riparazione illustrati di seguito, sono riferiti unicamente all'armatura normale non precompresa; gli stessi possono essere applicati anche per elementi incorporati in acciaio:

- **protezione contro la corrosione mediante il ristabilimento dell'ambiente alcalino (principio di riparazione R)**  
Questo principio si basa sulla ricostituzione di un nuovo strato passivo sulla superficie dell'acciaio (con una nuova passivazione) attraverso l'applicazione di prodotti di riparazione combinati con cemento.  
Un rivestimento della superficie di acciaio che impedisca la ripassivazione non può essere applicato.
- **Protezione contro la corrosione mediante limitazione del contenuto in acqua del calcestruzzo (principio di riparazione W)**  
Questo principio si basa sull'abbassamento del contenuto in acqua del calcestruzzo attraverso una forte diminuzione della capacità di conduttività elettrolitica in modo che la velocità di corrosione viene ricondotta a valori praticamente trascurabili.
- **Protezione contro la corrosione mediante rivestimento dell'armatura (principio di riparazione C)**  
Questo principio si basa sull'impedimento della solubilità anodica del ferro tramite un rivestimento idoneo sulla superficie dell'acciaio.
- **Protezione catodica contro la corrosione (principio di riparazione K)**  
Con un'immissione finalizzata di elettroliti nell'armatura e/o la sistemazione di anodi anti-corrosione o inerti è possibile raggiungere un effetto catodico di tutta l'armatura ed evitarne, in tal modo, la corrosione

– **Impedire la penetrazione di ossigeno fino alle parti in acciaio**

È possibile impedire la corrosione anche riducendo la penetrazione di ossigeno fino a contatto con la superficie in acciaio rivestendo interamente il calcestruzzo. Questo principio comunque **non** deve essere applicato come provvedimento di riparazione soprattutto perchè dal punto di vista della fattibilità costruttiva non può essere controllato con sicurezza.

Se dopo il controllo e la valutazione dello stato dovesse risultare che per la durata d'utilizzo prevista e nelle condizioni stabilite sono possibili delle corrosioni sull'armatura, deve innanzitutto essere valutata l'eventuale introduzione di **misure preventive**. Le stesse dipendono essenzialmente dalle cause potenziali di una futura corrosione. I relativi parametri sono illustrati nella figura 4.12.

**Le misure preventive contro la corrosione possono essere:**

- diminuzione del contenuto in acqua dell'elemento costruttivo
- diminuzione della penetrazione di  $\text{CO}_2$  cioè aumento della resistenza alla carbonatazione («freno della carbonatazione») ad es. tramite l'applicazione di un sistema di protezione superficiale ricorrendo ad una copertura dell'elemento costruttivo con materiale idoneo
- diminuzione della penetrazione di  $\text{Cl}^-$ , cioè aumento della resistenza alla penetrazione di cloruro

Tutte queste possibilità devono permettere di ridurre gli influssi in misura tale da non provocare più danni.

Si afferma spesso che con un **lavaggio intensivo della superficie del calcestruzzo** è possibile togliere i cloruri esistenti. Da controlli effettuati si è comunque potuto constatare che ciò non corrisponde al vero. Come dimostra la figura 4.21 il contenuto di cloruro viene sicuramente diminuito ma contemporaneamente lo stesso aumenta all'interno del calcestruzzo. Ad eccezione di un dilavamento dei cloruri in superficie, come è il caso per gli elementi costruttivi esposti alla pioggia, la quantità complessiva dei cloruri rimane praticamente invariata. **Questa misura non è quindi raccomandabile perchè la stessa porta inevitabilmente ad un aumento del rischio di corrosione in corrispondenza della zona dell'armatura.**

Va comunque precisato che la conoscenza delle procedure illustrate è carente e che mancano inoltre controlli sistematici.

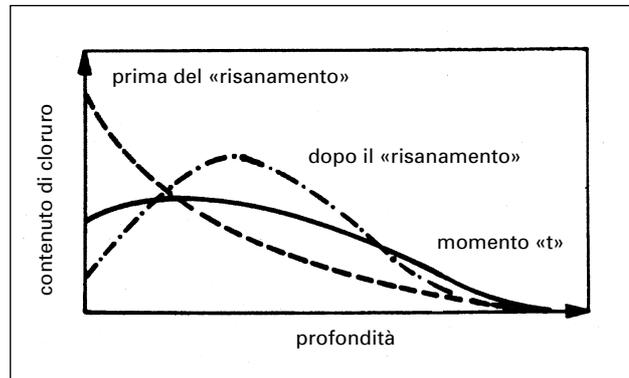


Figura 4.21 Cambiamento della concentrazione di  $\text{Cl}^-$  nel calcestruzzo prima e dopo un «risanamento» con un lavaggio sulla superficie di calcestruzzo [4.7].

Al momento della scelta di una misura di protezione bisogna sempre domandarsi se la stessa, in seguito, non crei dei presupposti peggiori come ad es. in caso di una riparazione nuova e più estesa. È possibile che con un determinato trattamento chimico si perda per un lungo periodo la resistenza a trazione dell'adesività nel caso in cui, in futuro, si rendesse necessaria una protezione della superficie del calcestruzzo.

#### 4.4.3.2 Misure di riparazione in caso di corrosione causata dalla carbonatazione del calcestruzzo

Quale base serve la ripartizione della profondità di carbonatazione sulla superficie di un elemento costruttivo, attraverso mezzi adeguati secondo la raccomandazione SIA 162/3 (1990), [4.14] (vedi figura 4.22).

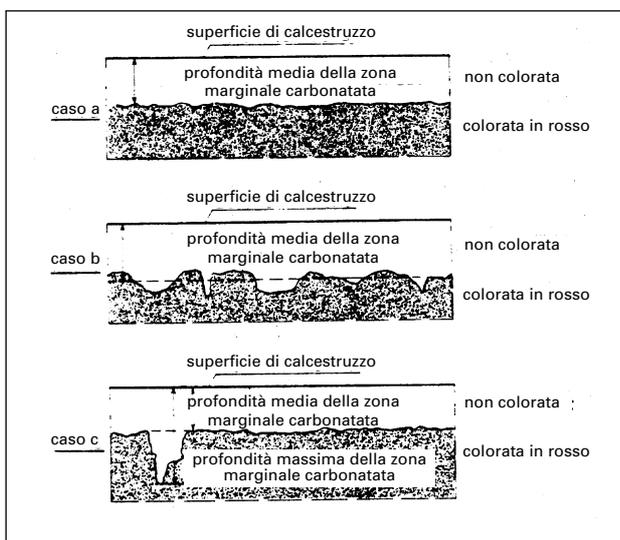


Figura 4.22 Possibile decorso del fronte di carbonatazione nel calcestruzzo [4.7].

In linea di principio sono possibili le seguenti soluzioni:

- a) **ripristino dell'ambiente alcalino** a seconda del caso sotto forma di:
- **applicazione estesa** di calcestruzzo o malta (principio di riparazione R1)
  - oppure
  - **riparazione locale** con calcestruzzo o malta (principio di riparazione R2)
  - È possibile anche una **rialcalinizzazione elettrochimica** da tempo oggetto di ricerca ed attualmente offerta ed eseguibile anche nella pratica (figura 4.23). Con questa procedura l'ambiente attorno all'armatura dovrebbe essere nuovamente alcalinizzato e la condizione originale con lo strato passivo protettivo nuovamente ripristinata. Nell'ambito di questa documentazione questa procedura

non viene trattata ulteriormente. Informazioni recenti in merito sono contenute in [4.16]. Gli esperti non si sono ancora accordati sull'efficacia e sull'idoneità di questo metodo. Come dimostra la figura 4.24 lo stato della conoscenza e dell'applicazione delle tre procedure elettromeccaniche è molto differenziato.

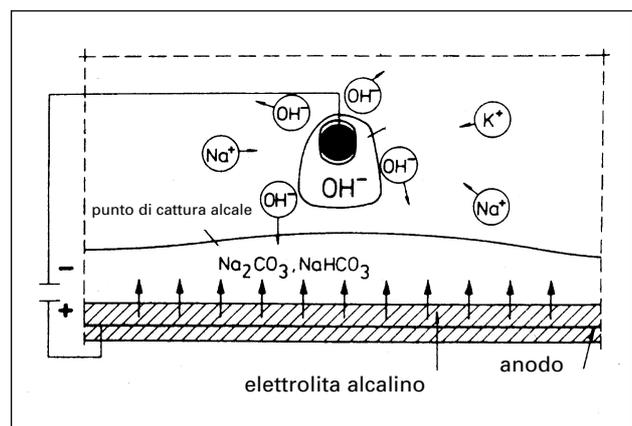


Figura 4.23 Rialcalinizzazione elettromeccanica [4.15].

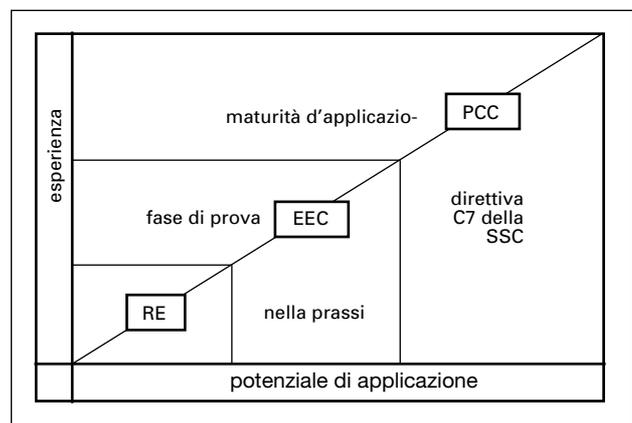


Figura 4.24 Stato di conoscenza ed applicazione delle procedure elettromeccaniche [4.17].  
 RE: rialcalinizzazione elettromeccanica  
 EEC: estrazione elettromeccanica di cloruro (cap. 4.4.3.3)  
 PCC: protezione catodica contro la corrosione (cap. 4.4.3.4).

In seguito sono trattati in particolare i processi di rialcalinizzazione con nuovo calcestruzzo o malta secondo i principi di riparazione R1 e R2 descritti successivamente.

In caso di misure di riparazione con **asportazione di calcestruzzo** deve inoltre essere chiarito, se ciò può pregiudicare la **sicurezza di portata** in misura inammissibile. Se l'armatura esistente risulta eccessivamente **danneggiata dalla corrosione**, la stessa deve essere **sostituita**.

È inoltre importante decidere se è necessaria un'incavigliatura per l'interazione tra il calcestruzzo vecchio e nuovo.

– **Applicazione estesa di calcestruzzo o malta - principio di riparazione R1:**  
(R = Rialcalinizzazione)

In questa procedura l'effetto di protezione è realizzato mediante un rivestimento in calcestruzzo combinato con cemento o malta applicato sull'intera superficie del calcestruzzo e nella zona che deve essere riparata (vedi figura 4.25).

Il rivestimento può essere applicato sia sull'intera superficie originale del calcestruzzo che sulle zone particolarmente degradate. Il calcestruzzo, rispettivamente la malta per riparazione devono avere una resistenza sufficiente alla carbonatazione in modo da assicurare una ripassivazione durevole dell'armatura.

Devono inoltre far si che la profondità di carbonatazione nel calcestruzzo di riparazione, rispettivamente nella malta, rimanga inferiore allo spessore del rivestimento alla fine della durata di vita auspicata. Non si devono tener in considerazione eventuali effetti positivi di misure supplementari di protezione della superficie. Se queste condizioni sono rispettate si può allora affermare con sicurezza che le zone carbonatate del vecchio calcestruzzo saranno rialcalinizzate attraverso processi di diffusione e potranno quindi proteggere in modo sicuro l'armatura dalla corrosione.

Il calcestruzzo deve essere asportato dove è distaccato, rispettivamente allentato a causa della corrosione dell'armatura. Il materiale inerte di sicurezza  $s_2$  deve rendere possibile l'introduzione, senza la formazione di cavità, del calcestruzzo di riparazione, rispettivamente della malta, e deve essere adeguato alle condizioni locali ed alla dotazione di macchinari.

Questa procedura può essere utilizzata soltanto se la profondità media di carbonatazione non vada oltre la superficie più esterna dello strato

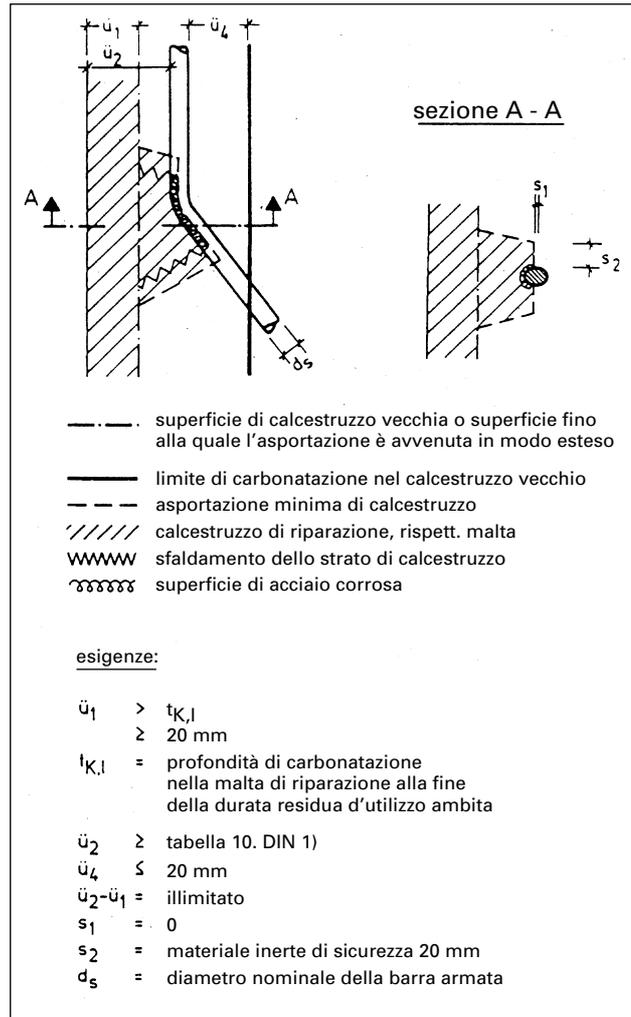


Figura 4.25 Principio di riparazione R1 - illustrazione schematica delle soluzioni generali [4.11] 1) secondo SIA 162 (1989) o direttive del committente.

dell'armatura di 20 mm. Nelle zone nelle quali la profondità media di carbonatazione è penetrata per più di 20 mm oltre la superficie più esterna dello strato dell'armatura, il calcestruzzo deve essere asportato fino a quel punto. L'armatura deve essere liberata dai prodotti corrosivi.

Come cemento per calcestruzzo di riparazione oppure malta dovrebbe essere utilizzato il cemento Portland.

– **Riparazione locale con calcestruzzo alcalino o malta - principio di riparazione R2:**  
 ( R = Rialcalinizzazione)

Con questa procedura si effettua una riparazione esclusivamente locale (vedi figura 4.26). La stessa è applicata soprattutto in zone localmente circoscritte in cui si manifesta la corrosione, ad es. in caso di carbonatazione profonda estesa soltanto localmente, rispettivamente in caso di coperture in calcestruzzo sottili. L'acciaio in corrispondenza della zona localizzata di corrosione situato nel settore di carbonatazione, deve essere scoperto indipendentemente dallo stato della corrosione medesima. Il calcestruzzo o la malta impiegati per la riparazione, devono presentare un'alcalinità sufficiente ed avere uno spessore ed una compattezza tali da assicurare una ripassivazione durevole.

Per il miglioramento della resistenza alla carbonatazione deve essere rivestita, di regola, l'intera superficie del calcestruzzo. La limitata durevolezza di questa misura deve essere tenuta in debito conto nel piano di manutenzione. E' possibile rinunciare a questa misura se le esigenze  $\ddot{u}_2 \geq \Delta t_{K,1}$  sono rispettate anche al di fuori del settore ristretto di riparazione senza misure supplementari di protezione della superficie.

Il procedimento R2 può essere applicato soltanto nel caso in cui  $\ddot{u}_2$  è maggiore di 10 mm. In caso di coperture in calcestruzzo più sottili viene applicata la soluzione di principio C.

I materiali inerti supplementari  $s_1$  e  $s_2$  devono rendere possibile l'introduzione del calcestruzzo di riparazione senza la formazione di cavità e devono essere conformi alle condizioni locali ed ai macchinari impiegati. In caso di tondini per cemento armato con un diametro  $d_s > 20$  mm,  $s_1$  deve essere aumentato ad un minimo di 15 mm.

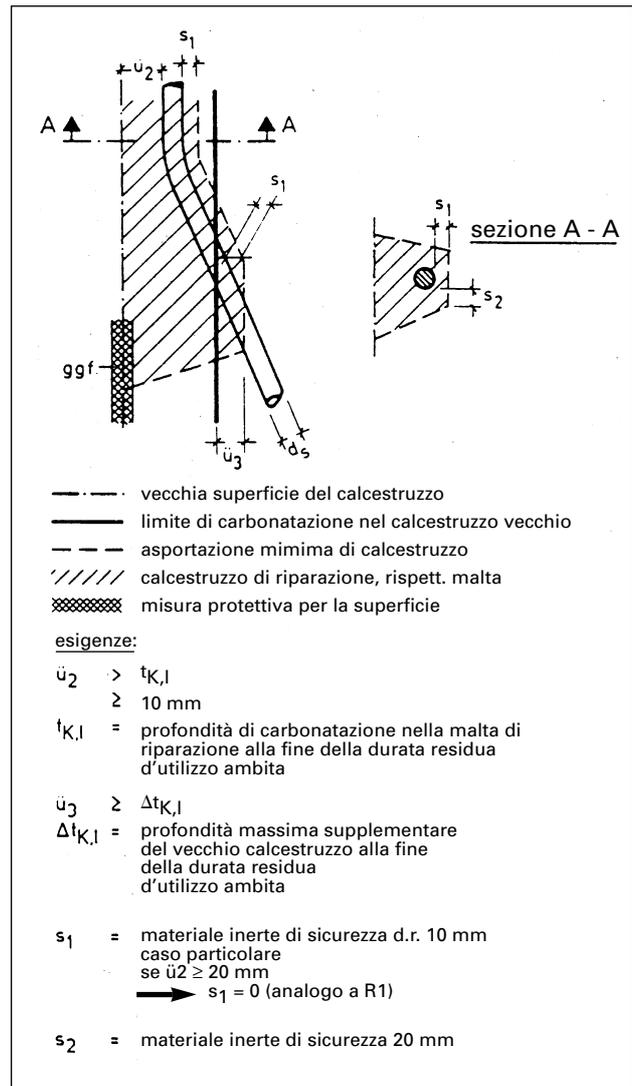


Figura 4.26 Principio di riparazione R2 - illustrazione schematica della soluzione di principio [4.11].

**b) Limitazione del contenuto di acqua nel calcestruzzo - principio di riparazione W:**  
( **W** = Limitazione del contenuto d'acqua)

In questo procedimento viene sfruttato il principio **dell'abbassamento e della comparatività del contenuto d'acqua** con conseguente inibizione diffusa del processo parziale elettrolitico di corrosione dell'armatura. Al momento non è comunque possibile indicare valori limiti sicuri del contenuto critico d'acqua. In base all'esperienza si può comunque supporre che non si verificheranno ulteriori danni causati dalla corrosione se la penetrazione dell'acqua sulla superficie nel calcestruzzo può essere impedita tramite misure idonee di protezione e se la penetrazione d'acqua da altre fonti (ad es. l'umidità del suolo, la diffusione del vapore acqueo da vani interni) viene esclusa. La soluzione di principio **W** è rappresentata schematicamente nella figura 4.27.

Il calcestruzzo deve essere asportato dalle zone difettose fino al settore dell'acciaio libero da corrosione.

Se la corrosione dell'armatura è presente soltanto sulla parte rivolta verso la superficie esterna del calcestruzzo, allora è possibile collocare il materiale inerte di sicurezza  $s_1 = 0$  (sezione B-B nella figura 4.27). Nei tondini per cemento armato con un diametro  $d_s \geq 20$  mm,  $s_1$  deve essere aumentato a 15 mm se ciò è necessario per l'introduzione sicura e completa del calcestruzzo di riparazione, rispettivamente della malta. Eventuali ripercussioni sul grado di stabilità devono essere tenute in considerazione. È possibile l'impiego di tutti i **calcestruzzi di riparazione, rispettivamente delle malte** citati nel cap. 4.4.6.

**Il successo del procedimento dipende dall'efficacia delle misure protettive sulla superficie. È possibile utilizzare soltanto sistemi di rivestimento idonei stabiliti per questo procedimento nel cap. 4.4.7.** Controlli regolari del trattamento della superficie e, se del caso, dei rinnovamenti, devono essere segnalati nel piano di manutenzione.

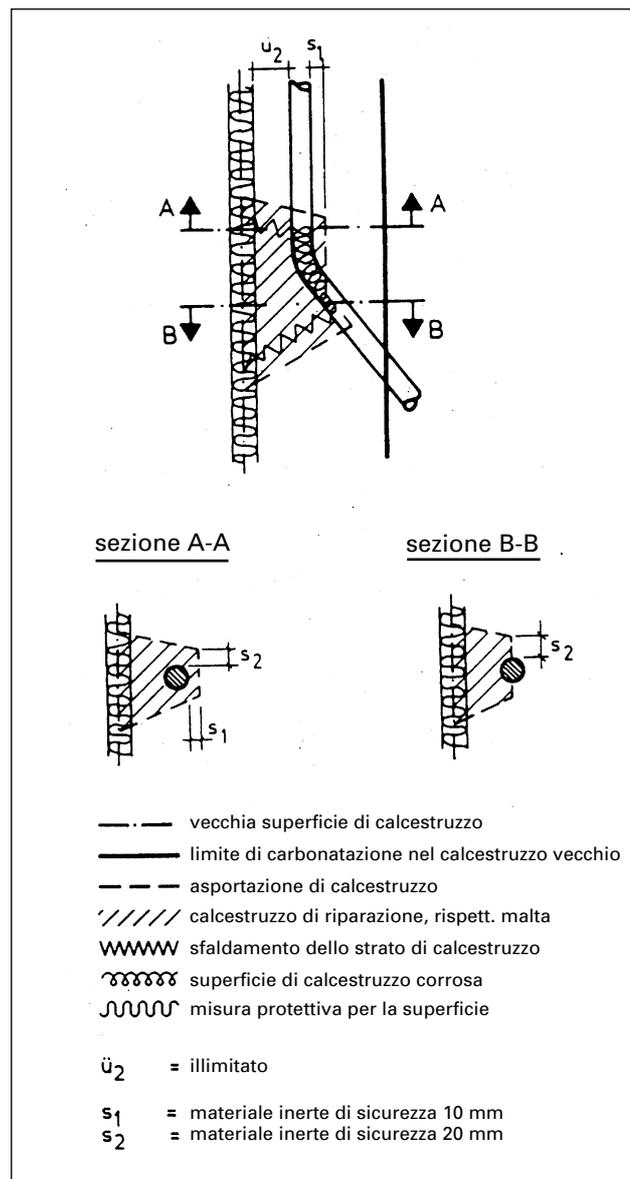


Figura 4.27 Principio di riparazione W - illustrazione schematica della soluzione di principio [4.11].

### c) Rivestimento dell'armatura - principio di riparazione C:

(C = Coating: rivestimento)

Se il calcestruzzo di riparazione, rispettivamente la malta con il principio R non possono garantire una ripassivazione durevole secondo il principio R o, se con la soluzione di principio R2, la copertura in calcestruzzo è inferiore a 10 mm dopo la riparazione, oppure ancora se il principio W non è dato o non è applicabile, allora l'armatura deve essere protetta permanentemente dalla corrosione secondo i **principi della costruzione in acciaio** in tutte le zone che durante la durata residua di utilizzazione prevista possono essere dipassivate (vedi figura 4.28). Il procedimento può essere applicato senza essere combinato con il principio W soltanto nel caso in cui il calcestruzzo possa essere asportato in modo così esteso da escludere una dipassivazione nelle zone non riparate durante la durata residua d'utilizzo. Di regola la superficie complessiva del calcestruzzo viene rivestita con un sistema di protezione supplementare per migliorarne la resistenza alla carbonatazione. Nel caso in cui si rinunci a questo procedimento è comunque necessario assicurarsi che il danno a seguito della corrosione sia riconducibile soltanto ad un difetto locale della copertura in calcestruzzo. Va comunque sottolineato l'effetto positivo di questa misura protettiva della superficie.

È possibile **utilizzare tutti i calcestruzzi di riparazione rispettivamente le malte citati. I sistemi di protezione contro la corrosione per l'acciaio dell'armatura devono corrispondere a quanto contenuto nel cap. 4.4.5.**

Per poter rispondere alle esigenze  $\ddot{u}_3 \geq \Delta t_{K,1}$  può essere necessaria una misura di protezione della superficie del calcestruzzo secondo quanto esposto nel cap. 4.4.7. Per permettere un controllo regolare e disporre delle dovute conoscenze in caso di rinnovamento è necessario segnalare le informazioni nel piano di manutenzione.

Se nell'asportazione del calcestruzzo necessaria, secondo il principio di riparazione C, l'armatura viene scoperta per essere rimossa, la stessa deve essere sostituita con **tondini per cemento armato rivestiti in resina epossidica**. Le direttive dell'Ufficio federale per la costruzione stradale riguardanti «l'utilizzo di toncini per cemento armato rivestiti con resina

epossidica» (1991) regolano in modo vincolante l'utilizzo degli stessi in caso di opere e manufatti della rete delle strade nazionali e principali [4.18].

È possibile utilizzare anche un armatura in toncini per cemento armato **antiruggine**.

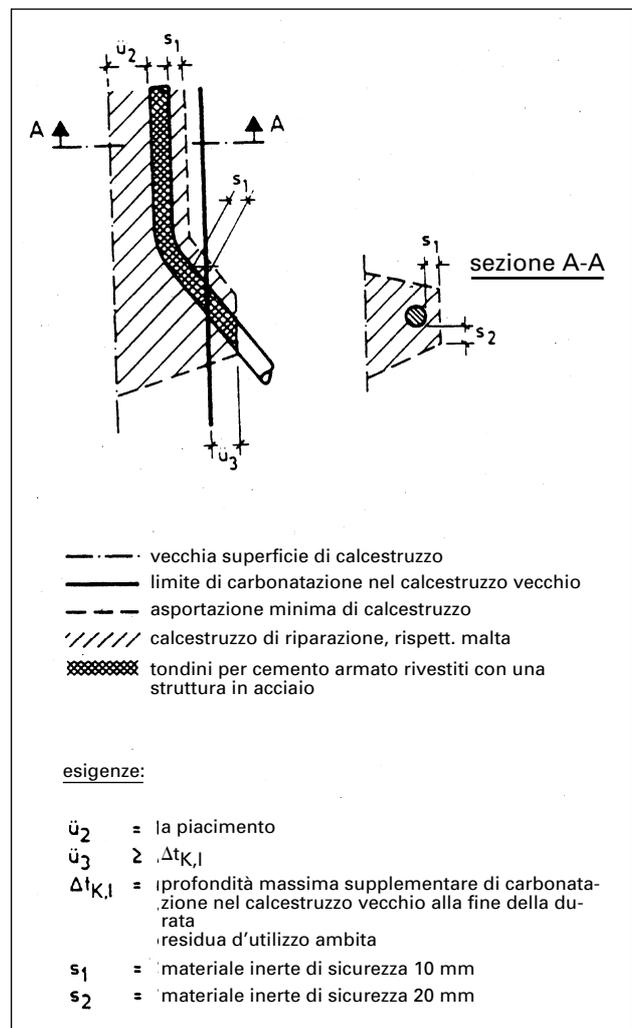


Figura 4.28 Principio di riparazione C - rappresentazione schematica della soluzione di principio [4.11].

#### 4.4.3.3 Misura di riparazione in caso di corrosione causata dall'influsso del cloruro

Nella determinazione delle misure di riparazione si deve partire dai meccanismi di danneggiamento dovuti agli effetti del cloruro citati nel cap. 4.3. Con l'ausilio di un controllo della costruzione l'ingegnere progettista deve disporre di conoscenze sullo stato complessivo di tutta la superficie dell'opera e della dimensione dell'inquinamento da cloruro anche in profondità. A seconda del caso specifico la ricerca avviene in modo **non distruttiva** con la misurazione del potenziale [4.9, 4.19, 4.20] o distruttiva attraverso prelevamenti di carote o di polvere di trapanatura, rispettivamente con **fori di sondaggio** e successive **analisi di laboratorio** [4.21, 4.22].

Il **contenuto critico di cloruro** nel calcestruzzo dipende da diversi fattori (vedi tabella 4.3). È inoltre importante interpretare correttamente i risultati del controllo a seconda del metodo di analisi utilizzato (vedi figure 4.29 e 4.30).

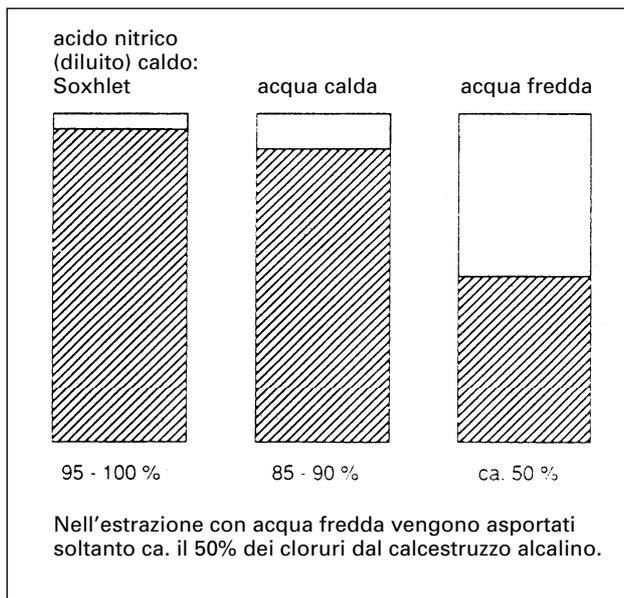


Figura 4.29 Determinazione del contenuto di cloruro nella prova di laboratorio: procedure e relativa estrazione di cloruri [4.22]. L'estrazione con acqua fredda non è raccomandata vedi [4.21].

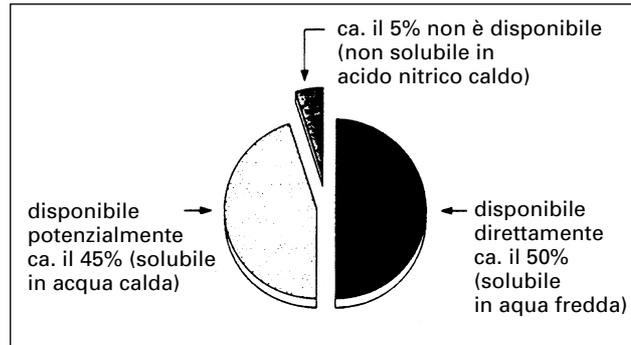


Figura 4.30 Ripartizione della quantità di cloruro nel calcestruzzo; fino al 95% del contenuto complessivo di cloruro è direttamente o potenzialmente disponibile per la corrosione [4.22].

Nelle pubblicazioni specializzate e nelle norme vengono indicati diversi valori limiti di cloruro. Anche se gli stessi rappresentano soltanto valori indicativi approssimativi, nella prassi vengono adottati valori limiti del 4% Cl<sup>-</sup> della massa di cemento. Se in corrispondenza dell'armatura di un elemento costruttivo questo valore limite è raggiunto o superato si può prevedere un rischio di corrosione. Va comunque detto che sul processo di diffusione che permette il trasporto del cloruro nel profilo di profondità nelle diverse direzioni non si dispongono di molte conoscenze. Se degli alti contenuti di cloruro non possono essere esclusi, allora gli stessi devono dapprima essere controllati approssimativamente nella zona di copertura del calcestruzzo. Se si dovessero accertare contenuti di cloruro superiori al 2% della massa di cemento o maggiori del 0.03% nella massa di calcestruzzo allora, in tal caso, devono essere rilevate le ripartizioni della concentrazione per tutto lo spessore dell'elemento costruttivo in corrispondenza della superficie in cui si manifesta l'immissione di cloruro. Se nello strato di copertura del calcestruzzo degli elementi costruttivi in cemento armato sono rilevati dei contenuti di cloruro superiori al 0.5% Cl<sup>-</sup> riferiti alla massa di cemento e negli elementi costruttivi in cemento armato precompresso dei valori superiori al 0.2% Cl<sup>-</sup>, la valutazione delle misure necessarie deve essere chiesta in collaborazione con un ingegnere specializzato. E ciò è necessario anche nel caso in cui, sulla superficie in calcestruzzo, non ci siano segni visibili di corrosione nell'armatura. Quando la composizione del calcestruzzo non è nota, è necessario valutare il contenuto di cemento nella parte non intaccata.

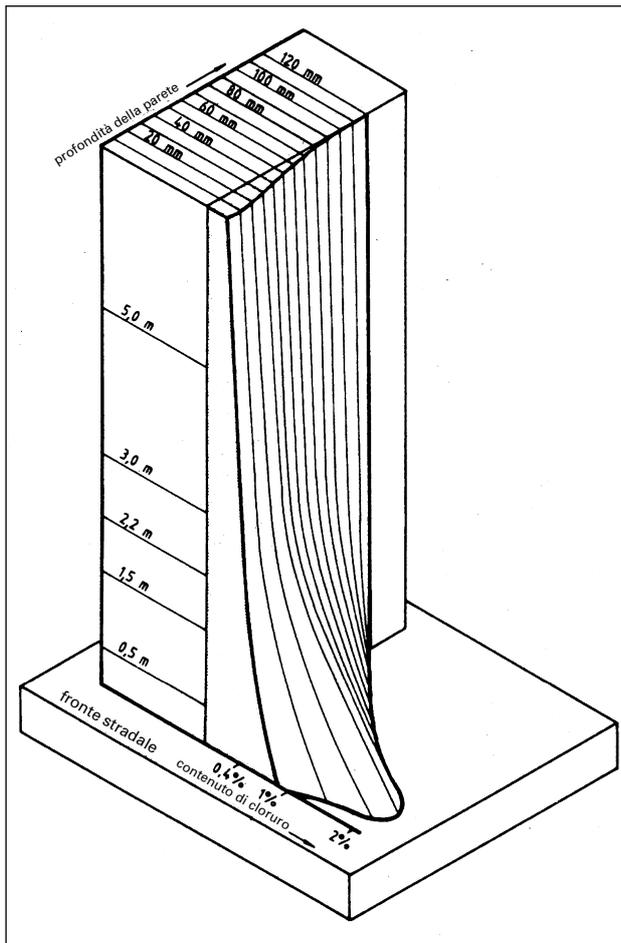


Figura 4.31 Ripartizione di cloruro in un muro di spalla lungo l'autostrada a Berlino [4.7].

In linea di massima sono possibili i seguenti provvedimenti di riparazione:

#### a) il ripristino dell'ambiente alcalino

In analogia al punto 4.4.3.2 a) risultano le seguenti soluzioni:

#### **rivestimento spesso con calcestruzzo alcalino o malta - principio di riparazione R1 - Cl:**

una ripassivazione di superfici in acciaio depassivate o corrose non è possibile con rivestimenti spessi alcalini, nel caso in cui la depassivazione è causata dall'influsso di cloruri. Una semplice applicazione della soluzione di principio R1 secondo il cap. 4.4.3.2 a) (corrosione do-

vuta alla carbonatazione del calcestruzzo) non è quindi ammessa.

Nelle zone dove il contenuto di cloruro supera il valore oltre il quale inizia la corrosione il calcestruzzo deve essere asportato ovunque sia necessario fino in corrispondenza dell'armatura e, per garantire un certo margine di sicurezza, anche oltre, conformemente a ciò che è indicato nella figura 4.32 ed indipendentemente dalla presenza o meno della corrosione.

Nel caso di penetrazione profonda e differenziata di cloruri il materiale inerte di sicurezza  $s_3$  è una garanzia contro possibili variazioni della profondità di penetrazione e dovrebbe essere superiore al valore di riferimento usuale indicato nella figura 4.33.

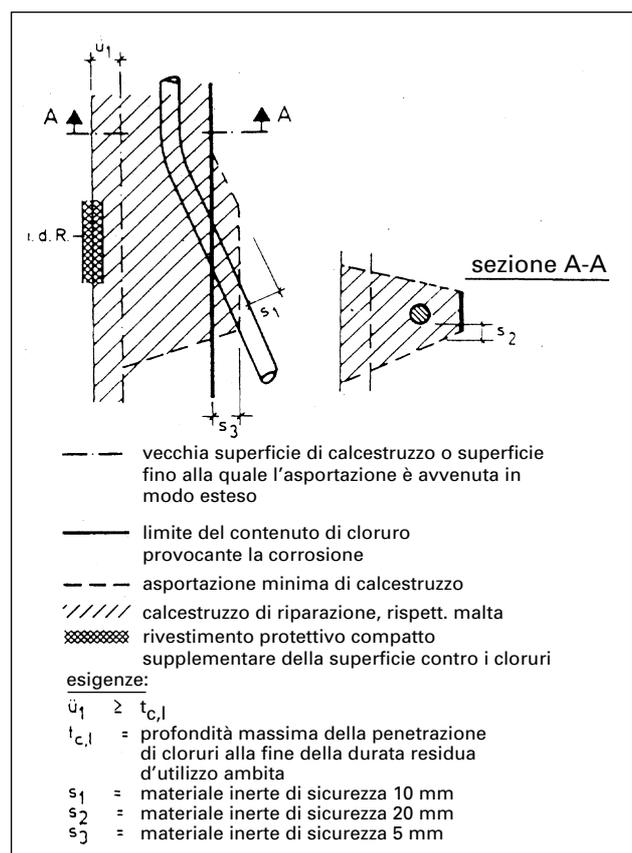


Figura 4.32 Principio di riparazione R1 - Cl, rappresentazione schematica della soluzione di principio [4.11].

Il rivestimento in calcestruzzo alcalino, rispettivamente in malta (se del caso accompagnato da un provvedimento di protezione della superficie) devono garantire che durante la prevista durata residua d'utilizzo non si verifichi un'ulteriore penetrazione di cloruro nel vecchio calcestruzzo. Per ciò è necessario applicare un rivestimento supplementare compatto che formi uno strato omogeneo su tutta la superficie del calcestruzzo. La composizione del calcestruzzo di riparazione, rispettivamente della malta, deve garantire che anche dopo la redistribuzione dei cloruri del vecchio calcestruzzo, non si raggiunga un contenuto tale da provocare una corrosione nella zona già risanata. Questa condizione è rispettata se è dimostrato quanto premesso al cap. 4.4.6

**Riparazione locale con calcestruzzo alcalino o malta - principio di riparazione R2 - Cl:**

in generale valgono le esigenze e condizioni citate per il principio di riparazione R2.

Il limite di carbonatazione indicato nella figura 4.26 deve essere sostituito con il limite del contenuto di cloruro che provoca la corrosione. Il sistema di protezione della superficie deve impedire un'ulteriore penetrazione di ioni di cloruro.

**b) Limitazione del contenuto di acqua nel calcestruzzo - principio di riparazione W - Cl:**

Nel calcestruzzo i cloruri aumentano la conduttività elettrolitica dello stesso. L'efficacia di misure di protezione delle superfici intese alla diminuzione ed alla comparatività del contenuto di acqua deve quindi essere maggiore di quella prevista in caso di corrosione da carbonatazione. Tenuto conto che attualmente non si dispone di conoscenze sufficienti e sicure, la procedura può essere applicata soltanto nel caso in cui siano eseguite delle prove di riparazione di superfici, rispettivamente di elementi costruttivi di riferimento, prima dell'esecuzione delle misure di riparazione. Queste prove-campione servono per poter esaminare gli effetti del provvedimento sull'avanzamento della corrosione nell'armatura, ad es. con l'istallazione di dispositivi idonei per la misurazione del flusso corrosivo.

Di regola valgono le esigenze e le condizioni citate nel principio di riparazione W. Il limite di carbonatazione nella figura 4.27 deve essere sostituito con il limite del contenuto di cloruro provocante la corrosione.

È possibile utilizzare tutti i calcestruzzi e malte di riparazione citati nel cap. 4.4.6. Il sistema di protezione della superficie deve corrispondere alle esigenze illustrate nel cap. 4.4.7 e deve impedire la penetrazione di ioni di cloruro.

**c) Rivestimento dell'armatura - principio di riparazione C - Cl:**

di regola valgono le esigenze ed i provvedimenti indicati nel principio di riparazione C.

Il limite di carbonatazione nella figura 4.28 deve essere sostituito con il limite del contenuto di cloruro provocante la corrosione.

**d) Estrazione di cloruri** (denominata anche decontaminazione clorurica)

Da alcuni anni diversi ricercatori e ditte sono impegnati nella riduzione dell'incrostazione di sali clorurici in una costruzione in calcestruzzo entro limiti ammissibili, attraverso l'estrazione dei cloruri con un procedimento elettrochimico (vedi figure 4.33 e 4.34).

In vari paesi esistono già le prime esperienze pratiche. Nel punto [4.16] è illustrato lo stato delle conoscenze tecniche. Come illustrato nella figura 4.24 questo procedimento si trova alla vigilia dell'applicazione nella pratica, ma alcune questioni rimangono comunque ancora in sospeso.

Se si opta, nel caso specifico, per questi provvedimenti, si deve dimostrare che il cloruro viene estratto con certezza e che l'alcalinità ed il contenuto d'acqua nel calcestruzzo da cui deriva la corrosione non vengono modificati sfavorevolmente sul lungo termine. È inoltre necessario esaminare se queste misure non provochino danni secondari alla struttura con blocchetti di cemento.

A causa del pericolo di penetrazione del cloruro a maggiori profondità, dopo la realizzazione del provvedimento deve essere rilevato un profilo della ripartizione di cloruro in corrispondenza dell'armatura fino ad almeno 5 cm oltre la medesima.

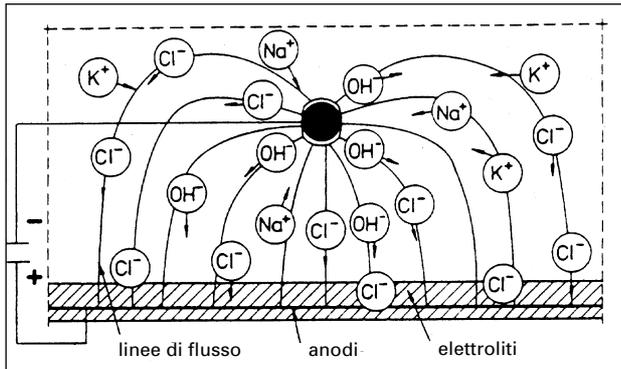


Figura 4.33 Estrazione elettrolitica di cloruro da [4.16].

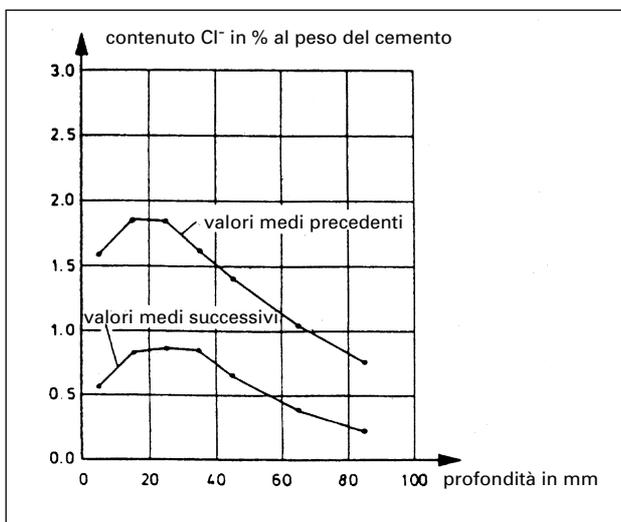


Figura 4.34 Esempio di un'estrazione di cloruro - risultato della desalinazione dopo 3 settimane da [4.16]

#### 4.4.3.4 Protezione catodica contro la corrosione - principio di riparazione K

Il principio della protezione catodica contro la corrosione è noto da tempo ed è utilizzato da molti anni con successo soprattutto per le tubazioni interrate. L'applicazione nelle costruzioni in cemento armato ha avuto inizio negli anni 70 nel Nord-America. In questo campo anche in Svizzera, a partire dal 1985, sono in corso delle ricerche e dei progetti pilota [4.23, 4.24].

Con una protezione catodica contro la corrosione è possibile raggiungere, mediante l'impiego controllato di corrente estranea e/o la sistemazione di anodi anticorrosione o inerti, un comportamento catodico dell'armatura rendendone impossibile la corrosione (figura 4.35).

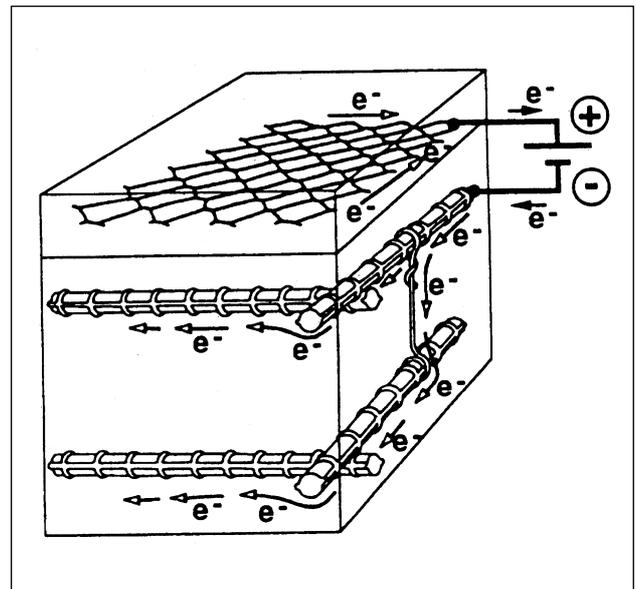


Figura 4.35 Principio della protezione catodica contro la corrosione con anodi inerti di corrente estranea e fonte di tensione continua da [4.23].

L'esperienza fatta con questa misura di protezione può ritenersi positiva se applicata correttamente. La stessa può essere impiegata anche nelle costruzioni fortemente contaminate da cloruro. La commissione per la corrosione ha elaborato una direttiva per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo della protezione catodica contro la corrosione di strutture portanti in cemento armato [4.25].

#### 4.4.4 Sottofondo in calcestruzzo e condizioni atmosferiche

##### 4.4.4.1 In generale

Troppo spesso ci si dimentica quanto sia importante l'influsso del **sottofondo in calcestruzzo** e delle **condizioni atmosferiche** nel caso di applicazione di materiali nuovi su elementi costruttivi esistenti. Il calcestruzzo deve presentare delle proprietà specifiche sia in merito alla **superficie** che al **sottofondo a contatto con la superficie**. La durezza può essere compromessa in modo incisivo in caso di un'adesività insufficiente. La superficie limite non deve quindi essere situata nel calcestruzzo danneggiato ed essere, tra l'altro, senza impurità che potrebbero causare disturbi all'aderenza.

A questo riguardo vogliamo brevemente soffermarci su un lavoro di ricerca svolto alla SPF di Zurigo che si occupa, tra l'altro, del problema della resistenza al taglio del raccordo tra vecchie e nuove costruzioni. Con degli esperimenti simulanti la pratica è stata controllata la formazione della superficie di contatto, del grado di granulazione nonché l'effetto dei vari tipi di spinatura. Ciò ha dimostrato che l'efficacia dei tasselli è influenzata in modo decisivo dal grado di granulazione.

Un obiettivo del lavoro è quello di definire le esigenze riguardanti la rugosità della superficie per il cantiere. Il rapporto conclusivo è atteso ancora nel corso di quest'anno [4.13].

Anche in merito alle **condizioni atmosferiche tollerabili** durante l'applicazione ed il trattamento successivo dei sistemi di protezione devono essere trovate delle soluzioni specifiche a seconda dei provvedimenti di riparazione.

##### 4.4.4.2 Esigenze

Per i calcestruzzi e malte di riparazione, rispettivamente per i sistemi di protezione della superficie trattati nei cap. 4.4.6 e 4.4.7, devono essere stabilite delle esigenze in riferimento alle seguenti caratteristiche:

###### – condizioni della superficie

Non solo lo stato della superficie è importante ma anche la condizione dello strato a contatto con la medesima (eventuali fessure ad es. a causa di asportazioni).

Per riparazioni locali, rispettivamente rivestimenti superficiali, il sottofondo del calcestruzzo deve:

- essere libero da elementi mobili e friabili (ad es. anche da spigoli di fessurazione a resi-

stenza minima) e da strati caratteristici facilmente scrostabili (ad es. la pelle di cemento) e non deve presentare sfarinamenti o sbriciolature,

- essere libero da fessure e scrostamenti che corrono parallelamente alla superficie o a forma di guscio, nelle zone di contatto con la superficie,
- essere libero da bavature; in alcuni casi giustificati è possibile lasciarle,
- avere una rugosità conforme al materiale utilizzato,
- essere libero da materiali estranei (derivanti dall'abrasione della gomma, solventi, vecchi rivestimenti non idonei, effiorescenze, olio, vegetazione ecc).

Cavità di ghiaia ed altre zone vuote devono essere riparate.

In relazione a fessure che si sviluppano ortogonalmente alla superficie vedi cap. 4.4.8. Per ciò che riguarda l'umidità della superficie si richiama il capitolo specifico alla pagina che segue. Per l'impregnazione valgono le indicazioni d'uso dei produttori.

###### – Caratteristiche meccaniche

Si tratta principalmente della resistenza a trazione del calcestruzzo in corrispondenza della superficie. Con riferimento ai valori richiesti ed il tipo di controlli si rimanda alla letteratura specializzata, come [4.26,4.7] ed all'esempio illustrato nella tabella 4.4.

###### – Caratteristiche chimiche

I criteri relativi alle proprietà chimiche del sottofondo di calcestruzzo si riferiscono soprattutto alla questione del fronte di carbonatazione ed al decorso del contenuto critico di cloruro. Le relative indicazioni sono contenute nel cap. 4.4.3.

###### – Umidità del calcestruzzo

Prima dell'esecuzione della riparazione locale, dell'impregnazione o della posa di un rivestimento superficiale devono essere adempite le seguenti condizioni:

- quasi tutti i calcestruzzi combinati con resina sintetica, rispettivamente malte, mezzi di impregnazione e materiali di rivestimento formanti pellicole, necessitano di un sottofondo in calcestruzzo asciutto o al massimo umido. Per l'applicazione di un rivestimento combinato con cemento, di un ponte di aderenza nonché per la riparazione locale con calcestruzzo/malta combinati con cemento con o senza

additivi di materiali sintetici così come per i rivestimenti in materiale sintetico formanti pellicole per la dispersione dell'acqua, il sottofondo del calcestruzzo deve essere umido.

- Nel sistema di protezione della superficie OS 8 con una determinata esigenza di aggiunta di additivi, il sottofondo del calcestruzzo può essere bagnato (i sistemi di protezione della superficie sono classificati nella tabella 4.9). Secondo la direttiva [4.11]
- «Asciutto» significa: una nuova superficie di rottura con una profondità di ca. 2 cm non deve (a causa dell'essiccazione) diventare visibilmente più chiara. Nei casi in cui persistono dei dubbi il calcestruzzo è da considerare asciutto se presenta l'umidità di compensazione per il clima 23/50.
- «Umido» significa: la superficie ha un aspetto opaco umido ma non deve presentare uno strato acquoso brillante; il sistema poroso del sottofondo del calcestruzzo non deve essere saturo d'acqua, il che significa che le gocce d'acqua che appaiono devono essere assorbite ed in breve tempo la superficie deve nuovamente avere un aspetto opaco.
- «Bagnato» significa: il sistema poroso del sottofondo di calcestruzzo può essere saturo d'acqua; la superficie del calcestruzzo può avere un aspetto brillante, ma non deve presentarsi come una pellicola d'acqua gocciolante.

Se vengono richiesti dei valori specifici più precisi sul materiale (ad es. da parte del produttore), quelli presenti, nel caso in esame, devono essere rilevati ed eventualmente adeguati alle esigenze.

#### – **Temperature**

La tabella 4.6 contiene dei valori indicativi per le temperature del sottofondo di calcestruzzo e per lo strato d'aria attiguo che possono essere utilizzati in assenza di altre indicazioni. In tal ca-

so lo sviluppo della temperatura durante l'esecuzione ed anche durante uno spazio di tempo determinato, dovrà essere osservata (ad es. raffreddamento durante la notte, particolarità locali).

Per i materiali combinati con prodotti sintetici la temperatura della superficie del calcestruzzo, ed in caso di rivestimenti di base la temperatura del relativo sottofondo, devono essere di almeno 3K sopra il punto di rugiada.

#### – **Altre condizioni atmosferiche**

Se da parte del produttore non esistono delle indicazioni specifiche per i materiali utilizzati, come base possono essere prese le disposizioni indicate nella tabella 4.7.

#### – **Vibrazioni nelle costruzioni**

Soprattutto nella costruzione di ponti i provvedimenti di riparazione devono spesso essere eseguiti in presenza di traffico con conseguenti vibrazioni della costruzione. D'altra parte anche i lavori di costruzione medesimi possono provocare delle vibrazioni.

Una verifica se i materiali utilizzati possono sopportare queste vibrazioni senza danno riducendole eventualmente entro limiti tollerabili si rende quindi necessaria. Nella letteratura specialistica troverete delle indicazioni utili [4.7, 4.27]. La fase critica del calcestruzzo fresco si situa nello spazio di tempo tra le 3-14 ore dopo la posa. Le vibrazioni con delle velocità di oscillazione fino a 20 mm/sec. non hanno conseguenze sfavorevoli se l'ampiezza delle escursioni è inferiore ai 0.7 mm. Quando si raggiunge una resistenza alla compressione di 5-6 N/mm<sup>2</sup> anche maggiori vibrazioni sono influenti. Velocità di oscillazione con ampiezza delle escursioni tali da provocare dei danni al calcestruzzo in fase di indurimento, sono raggiunte raramente.

	Misure di protezione, rispettivamente di riparazione: riparazione locale, rispettivamente rivestimento superficiale	Resistenza a trazione della superficie <sup>1)</sup>		Altro
		valore medio	valore indivi- duale minimo	
		N/mm <sup>2</sup>		
	1	2	3	4
1	calcestruzzo/malta di cemento anche modificato con materiale sintetico	≥ 1,5	≥ 1,0	rilevamento della resistenza alla compressione e del modulo-E <sup>2)</sup> , <sup>3)</sup>
2	conglomerato reattivo di resina/ malta per superfici non percorribili	≥ 1,5	≥ 1,0	–
3	OS 2, OS 4 <sup>4)</sup>	–	≥ 0,5	–
4	OS 3 <sup>4)</sup>	–	≥ 1,0 <sup>5)</sup>	–
5	OS 5 <sup>4)</sup>	≥ 1,0	≥ 0,8	–
6	OS 6, OS 7, OS 9, OS 10, OS 11 <sup>4)</sup>	≥ 1,5	≥ 1,0	–
7	OS 8, OS 12 <sup>4)</sup>	≥ 2,0	≥ 1,5	–
<sup>1)</sup> la resistenza a trazione della superficie è riferita al procedimento di perforazione esplorativa (confronta DIN 1048, parte 2) <sup>2)</sup> nel caso di applicazione in settori costruttivi con funzione statica <sup>3)</sup> per quanto riguarda il singolo caso la decisione spetta all'ingegnere progettista <sup>4)</sup> OS vedi cap. 4.4.7 <sup>5)</sup> a seconda del carico.				

Tabella 4.4 Proprietà meccaniche [4.11].

	Procedura		avanzamento)	Applicazione							Esigenze particolari	Rendimento profondità di asportazione ripercussioni particolari	Trattamento minimo supplementare	Smaltimento carico ambientale <sup>1)</sup>		
	tipo	utensile		scopo <sup>2)</sup>			superficie									
				A	B	C	D	w	s	ü					ö	I
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	tagliare	rettificatrice ad angolo	H	-	-	-	x	x	x	x	lunghezza a scelta	secondo l'utensile fino a ca. 3 cm	soffiare fuori, aspirare	polvere, rumore		
2		macchina per giunti	M	-	-	-	x	(x)	(x)	(x)	-	50 cm	risciacquare, soffiare fuori, ev. aspirare	acqua, fango rumore		
3	presellare	scalpello	H	(x)	x	-	x	x	x	(x)	-	vibrazioni danno più profondo	(getto, spazzare) pulire con aria compressa o aspirare	polvere, rumore		
4			M	-	-	-	x	(x)	(x)	(x)	-	-	-	-	-	
5	battere	macchina per battitura	H	-	-	-	x	x	x	-	-	vibrazioni danno più profondo	(getto) spazzare pulire con aria compressa o aspirare	polvere, rumore		
6			M	-	x	-	x	-	-	-	x	-	-	-	-	
7	martellare	pistola ad ago	H	-	-	-	x	x	x	x	-	-	polire con aria compressa o aspirare	polvere, rumore		
8			H	x	-	-	-	x	x	x	x	-	-	-	-	
9	fresare	fresatrice	M	-	-	-	x	x	x	-	x	secondo la compattezza del calcestruzzo e della regolazione dell'utensile profondità ca. 1 fino 3 mm	(getto) spazzare pulire con aria compressa o aspirare	polvere, rumore		
10			M	x	-	-	(x)	x	(x)	(x)	-	x	3 fino 8 mm	-	-	
11	rettificare (superfici, fessure)	rettificatrice	H	x	-	-	x	x	(x)	-	x	profondità ≤ 2 mm	polire con aria compressa o aspirare	polvere, rumore		
12			M	x	-	-	(x)	x	(x)	(x)	-	x	-	-	-	
13	getto	utensile per il getto	H	x	x	-	x	x	x	x	-	dipendente dalla durata del getto e dalla compattezza del calcestruzzo fino a pochi mm	polire con aria compressa o aspirare	aspirazione della polvere		
14			M	x	-	-	-	x	x	-	-	x	-	-	-	
15	getto	miscela acqua-sabbia	H	x	-	-	x	x	x	(x)	x	dipendente dalla durata, pressione e compattezza del calcestruzzo fino a pochi cm	risciacquare con acqua in pressione se necessario asciugare	acqua, fango		
16			M	x	x	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-	
17	getto	acqua ad alta pressione >600 bar	H	-	(x)	-	x	x	x	(x)	x	-	se necessario asciugare	-		
18			M	-	-	-	-	x	x	(x)	(x)	-	-	-	-	
19	spazzolare	spazzola a mano	H	(x)	-	-	x	x	x	-	x	profondità ≤ 1 mm	polire con aria compressa o aspirare	polvere		
20			M	-	-	-	x	(x)	(x)	-	-	-	-	-	la polvere viene quasi sempre aspirata	

Tabella 4.5 Procedure di trattamento per raggiungere gli obiettivi [4.11] Forts.



	Materiale da applicare	Valore minimo                      Valore massimo °C	
		2	3
	1		
1	materiali combinati con cemento, anche con additivi sintetici	5	30
2	resine reattive e conglomerati reattivi di resina/malta (OS 3 e 6-12) così come materiale di riempimento per fessure	8	40
3	sistemi di protezione di superfici a componente unica con solventi: OS 1 e 2 <sup>1)</sup> OS 4 <sup>1)</sup>	5 8	30 30
4	sistemi di protezione di superfici disperdenti acqua (OS 5) <sup>1)</sup>	10	40
1) OS vedi cap. 4.4.7			

Tabella 4.6 Temperature limite del sottofondo di calcestruzzo e dello strato d'aria a diretto contatto (valori indicativi) [4.11].

	Elementi atmosferici	Materiali combinati con cemento e con additivi sintetici	Materiali combinati con prodotti sintetici
	1	2	3
1	umidità relativa dell'aria	nessuna esigenza	in modo che la temperatura del calcestruzzo si situi al di sopra di $\geq 3K$ del punto di rugiada
2	pioggia	senza pioggia	senza pioggia o umidità in presenza di nebbia
3	vento/sole	l'essiccamento tramite il vento (esigenza $\leq 3$ Beaufort, corrispondente a $\leq$ ca. 5 m/s) e/o l'irraggiamento solare deve essere evitato	deve essere privo di polvere

Tabella 4.7 Condizioni atmosferiche salvo la temperatura [4.11].

#### 4.4.5 Trattamento preliminare dell'armatura

##### 4.4.5.1 In generale

Le considerazioni che seguono sono riferite ai tondini per cemento armato secondo le norme SIA 162 e 162/1 e valgono di conseguenza anche per singoli elementi incorporati in acciaio. Se in un elemento costruttivo da risanare sono presenti tondini per cemento armato zincati o rivestiti con materiale sintetico o acciaiature precompresse è consigliabile consultare un esperto. Indicazioni inerenti il trattamento preliminare dell'armatura sono contenuti, tra l'altro, nei punti [5.6] e [4.11].

##### 4.4.5.2 Disossidazione delle superfici in acciaio

Alcune volte si è dell'opinione che le superfici in acciaio corrose non devono essere disossidate se si tratta di una corrosione debole. Questa interpretazione non è condivisibile. Un'eccezione è rappresentata dall'applicazione della protezione catodica contro la corrosione (principio di riparazione K secondo cap. 4.4.3.4). Con questo procedimento di protezione è possibile rinunciare, se del caso, alla rimozione degli strati di ruggine presenti.

I tondini per cemento armato non interrati devono essere disossidati attraverso un procedimento meccanico. L'utilizzo dei cosiddetti trasformatori e stabilizzatori della ruggine su una superficie corrosa invece di applicare i principi di riparazione citati nel cap. 4.4.3, deve essere evitato.

Le esigenze poste nei confronti della disossidazione dipendono dal principio di riparazione utilizzato. Nel punto [4.11] viene stabilito quanto segue:

- Principi di riparazione R e W:  
superfici in acciaio che non devono essere rivestite, sono da trattare in modo da raggiungere in tutte le parti scoperte un grado di purezza di St 2 o Sa 2. I procedimenti applicabili vanno dalla disossidazione manuale a quella a getto con sistemi a secco o ad acqua e con getti ad alta pressione (> 600 bar). Una disossidazione con getto d'acqua ad alta pressione può essere equiparato al grado di purezza St 2 anche se l'aspetto non corrisponde ai campioni fotografici secondo DIN 55 928 parte 4. Per la corrosione causata dal cloro è necessario un trattamento preliminare con un getto d'acqua ad alta pressione.

- Principio di riparazione C:  
le superfici in acciaio da rivestire devono presentare, dopo il trattamento, un grado di purezza di almeno Sa 2 1/2. In tal caso è necessaria una disossidazione a getto con un sistema di disossidazione a secco o ad acqua. Nel caso di utilizzo di getti ad acqua le esigenze poste valgono dal momento dell'interruzione del trattamento. Le esigenze di purezza devono essere osservate sia per tutte le parti in acciaio da rivestire sia per le superfici rivolte dalla parte opposta alla direzione del getto così come nei punti di interconnessione delle armature. Per rendere possibile quanto indicato devono essere modificate le prescrizioni usuali di rottura del calcestruzzo ricorrendo eventualmente ad un procedimento specifico citato nei cap. 4.4.2 e 4.4.3. Nel caso di una corrosione indotta da cloro è necessario un trattamento preliminare con un getto d'acqua ad alta pressione.

##### 4.4.5.3 Rivestimenti delle superfici in acciaio

Il rivestimento del tondino per cemento armato è necessario nel caso in cui è impossibile raggiungere una protezione duratura contro la corrosione per mezzo di altri procedimenti. Dal punto di vista **pratico-costruttivo**, si tratta in questo caso di un **provvedimento problematico** che deve essere scelto **soltanto in casi particolari**.

Come già indicato nel cap. 4.4.3.2 in caso di sostituzione completa di tondini per cemento armato danneggiati, può essere utilizzata un'armatura rivestita di resina epossidica conformemente a quanto indicato al punto [4.18].

Nel caso in cui l'armatura deve essere rivestita possono essere seguiti i principi di protezione della superficie applicati nelle costruzioni in acciaio secondo il punto [5.6], tenendo comunque conto delle esigenze specifiche del cemento armato (vedi a questo riguardo anche le indicazioni che seguono). Ne fanno parte soprattutto le possibili **modifiche del comportamento di aderenza** degli acciai rivestiti. A seconda della situazione può essere necessario determinare la capacità di aderenza tramite il controllo No. 35 nella norma SIA 162/1 (1989).

Come materiale di rivestimento possono essere utilizzati sistemi indurenti reattivi e malte liquide di cemento modificate con prodotti sintetici.

La lavorazione deve avvenire secondo le indicazioni del produttore. I valori limite indicati per la temperatura e l'umidità devono essere rispettati. Per ogni ulteriore procedimento fa stato il cap. 4.4.4.

In caso di applicazione di un unico strato di sistemi indurenti reattivi, lo spessore minimo dello strato deve essere di almeno 300 m. Lo spessore dello strato di malta liquida di cemento modificata con prodotti sintetici deve essere di almeno 1'000  $\mu\text{m}$ . Questo rivestimento deve essere applicato con almeno 2 fasi di lavoro. Un insabbiatura non è necessaria. Ulteriori esigenze sono contenute nelle indicazioni di lavoro del fabbricante. Particolare attenzione deve essere prestata alla zona di raccordo tra l'acciaio da rivestire e quello che si trova nel calcestruzzo di sottofondo. Tutte le parti distaccate devono essere allontanate accuratamente. Il rivestimento deve essere esteso al calcestruzzo attiguo per alcuni millimetri. Un'ulteriore estensione del rivestimento del calcestruzzo deve essere evitata. L'adesività del calcestruzzo di riparazione sul rivestimento deve essere sufficientemente garantita. I materiali di rivestimento devono essere resistenti contro l'alcalinità del blocchetto di cemento ed unitamente ai procedimenti di applicazione, garantire una protezione duratura contro la corrosione.

#### 4.4.6 Calcestruzzi e malte di riparazione

Per le riparazioni vengono utilizzati i seguenti calcestruzzi e malte:

– **calcestruzzo secondo le norme SIA 162 e 162/1 (1989)**

È necessario osservare le prescrizioni citate nelle norme. Siccome le stesse sono insufficienti va tenuto anche conto delle esigenze di cui al cap. 4., ad es. in relazione al fattore W/Z.

– **Calcestruzzo a proiezione**

Nel nostro paese, l'utilizzo del calcestruzzo a proiezione non è regolato in maniera soddisfacente dalle norme. Il punto [4.28] contiene delle prescrizioni che valgono per le costruzioni sotterranee. Si tratta comunque di una bozza per una procedura di consultazione.

In diversi paesi esteri esistono delle norme e direttive, come ad es. in Germania la DIN 18 551 [4.29]. Indicazioni più estese su altre norme riguardanti la tematica del calcestruzzo a proiezione sono contenute nel punto [4.30].

Per ulteriori informazioni rimandiamo ai risultati delle ricerche effettuate dall'Istituto per la progettazione e la manutenzione in campo edilizio della SPF Zurigo [4.27, 4.31, 4.32, 4.33].

– **Malta di cemento**

Per quanto riguarda la malta di cemento è possibile applicare le prescrizioni riferite al calcestruzzo.

– **Calcestruzzo e malta di cemento modificati con prodotti sintetici**

In questo ambito non esistono in Svizzera, regolamentazioni sulle esigenze poste nei confronti dei prodotti. Il punto [4.26] segnala che tutte le indicazioni essenziali per un'esecuzione a regola d'arte devono essere contenute nelle istruzioni d'uso dei produttori.

– **Conglomerati reattivi di resina e malta**

Anche in questo caso fanno stato le osservazioni di cui al punto precedente.

I conglomerati reattivi di resina e malta sono utilizzati per misure di protezione o riparazione soltanto quando:

- è richiesta una capacità elevata di resistenza chimica unitamente ad una resistenza meccanica all'abrasione
- è necessario un indurimento rapido
- non sono possibili i provvedimenti indispensabili di trattamento successivo per i calcestruzzi di cemento e malte (con o senza aggiunta di prodotti sintetici)
- i valori indicativi per lo spessore degli strati indicati nella tabella 4.8 in caso di applicazione estesa ( $\geq 1\text{m}^2$ ) per i calcestruzzi di cemento e malte (con o senza aggiunta di prodotti sintetici), devono essere inferiori.

Per ulteriori indicazioni relative all'utilizzo dei conglomerati reattivi di resina e malte vedi le istruzioni d'uso dei produttori ed il punto [4.11].

– **Osservazioni**

A questo punto ci si deve chiedere se non sia giunto il momento di introdurre, anche da noi, gradualmente e sistematicamente **un primo controllo della garanzia di qualità, della sorveglianza propria da parte del produttore e del controllo da parte di un organo tecnico di sorveglianza esterno**, citati nelle nuove direttive della SIA.

Per procedere in questo senso è comunque necessario determinare in modo chiaro le regole del gioco e le esigenze. Fino all'introduzione di una specifica norma - CEN (vedi cap. 4.4.1) può essere utilizzata la direttiva del DAfStb [4.11]. Per i prodotti trattati nei cap. 4.4.7 e 4.4.8 vale la stessa osservazione.

tipo di calcestruzzo, rispettivamente di malta	diametro massimo del grano in mm	spessore dello strato, inferiore superiore valore indicativo	
		mm	
1	2	3	4
calcestruzzo	>4	30	–
malta di cemento	≤4	20	40
calcestruzzo e malta modificati con prodotti sintetici	>4 ≤4	30 10 <sup>1)</sup>	– 40
conglomerato reattivo di resina e malta	>4 ≤4	15 5	40 15

**Tabella 4.8** Valori indicativi degli spessori dello strato in caso di applicazione estesa [4.11]

<sup>1)</sup> per il ripristino dell'ambiente alcalino di protezione contro la corrosione con calcestruzzo, rispettivamente malta modificati con prodotti sintetici, lo spessore minimo dello strato nel caso di applicazione del principio di riparazione «R 1» è di:  $\bar{u}_1 = 20$  mm (vedi cap. 4.4.3.2).

#### 4.4.7 Sistemi di protezione delle superfici

Attualmente sono in commercio un numero notevole di prodotti e sistemi. Anche in questo caso fanno stato le osservazioni fatte nel cap. 4.4.6 relative ai calcestruzzi modificati con prodotti sintetici e calcestruzzi con resina reattiva. Per la progettazione e l'esecuzione sono necessarie le indicazioni del produttore. Le possibilità di confronto tra i prodotti e riferimenti a valori orientativi sia fisici che chimici stabiliti in modo sistematico sono pressochè inesistenti.

Fino all'introduzione di una norma europea ci sembra opportuno appoggiarci a quanto contenuto in [4.11], considerato che alcuni noti produttori hanno superato con successo i relativi controlli preliminari.

Nella tabella 4.9 sono indicati i sistemi di protezione della superficie suddivisi in 12 settori di applicazione. Contemporaneamente sono pure indicati gli spessori minimi degli strati specifici del sistema ed i gruppi di leganti solitamente utilizzati. La direttiva contiene inoltre delle indicazioni per ciascuna delle 12 classi ed esigenze dettagliate su:

- struttura dei sistemi
- parametri dei prodotti e sistemi
- proprietà del ricoprimento di fessure
- sottofondo di calcestruzzo
- esecuzione

Per ulteriori informazioni rimandiamo al punto [4.11]. Con ciò l'ingegnere progettista ha la possibilità di scegliere ed introdurre nel capitolato d'offerta un sistema di protezione della superficie riferito al caso specifico di applicazione. I venditori devono quindi produrre la documentazione in merito al controllo preliminare. Come garanzia di qualità può essere richiesto quanto indicato nel punto [4.34].

In base allo stato attuale dei lavori, anche la CEN sta percorrendo una strada simile con il tentativo di semplificare il tutto mediante una riduzione delle classi.

Descrizione abbreviata	Valori indicativi specifici del sistema per spessori minimi degli strati	Gruppi principali di leganti
1	2	3
PS 1 impregnazione idrofobizzante	–	silano, siloxan, resina siliconica
PS 2 sigillatura per le superfici non carrabili	50 µm	AI
PS 3 sigillatura per le superfici carrabili	50 µm	EP, AI, PUR
PS 4 rivestimento per le superfici non carrabili	80 µm	AI, PUR-AI
PS 5 rivestimento per le superfici non carrabili con un riempimento della fessura per lo meno esiguo	a) 300 µm b) 2000 µm	dispersione-AI, dispersione Propinat-Copolymere dispersione-cemento-malta liquida
PS 6 rivestimento resistente agli agenti chimici per le superfici sottoposte ad una sollecitazione meccanica minima	500 µm	EP, PUR
PS 7 rivestimento sotto strati impermeabilizzanti bituminosi in ponti ed opere simili	1 mm	EP
PS 8 rivestimento resistente agli agenti chimici per superfici carrabili sottoposte ad una sollecitazione meccanica forte	1 mm	EP
PS 9 rivestimento per superfici non carrabili con un riempimento della fessura per lo meno aumentato	1 mm	PUR
PS 10 rivestimento come strato impermeabilizzante sotto strati bituminosi od altri strati protettivi o di copertura con un riempimento della fessura molto forte	2 mm	PUR
PS 11 rivestimento per superfici carrabili con un riempimento della fessura per lo meno aumentato	3-5 mm	EP-PUR
PS 12 rivestimento con conglomerato di resina reattiva o malta per superfici carrabili sottoposti ad una sollecitazione meccanica forte	5 mm	EP

Figura 4.9 Sistemi protettivi della superficie [4.11]

PS: sistemi protettivi della superficie, AI: acrilato, EP: epossido, PUR: poliuretano.

#### 4.4.8 Riempimento delle fessure

Il riempimento delle fessure fa parte dei sistemi di protezione nelle costruzioni in calcestruzzo. Negli ultimi anni sulla problematica delle fessure sono state fatte molte pubblicazioni. In questo ambito si rinuncia ad un'elencazione della documentazione relativa demandando la trattazione ai punti [3.2, 3.3, 4.2, 4.5].

Prima di iniettare le fessure devono essere determinate le cause della loro comparizione, valutato l'influsso sulla sicurezza di portata e l'incidenza sull'idoneità d'uso e durevolezza.

L'iniezione delle fessure deve essere intrapresa quando si intendono raggiungere uno o più degli obiettivi che seguono:

- **Chiusura:**  
frenare o impedire la penetrazione di sostanze che provocano la corrosione attraverso le fessure dell'elemento costruttivo
- **Impermeabilizzazione:**  
eliminazione dell'anermeticità dovuta alla presenza di fessure
- **Raccordo con capacità di dilatazione:**  
creare una giunzione tra le due sponde della fessura con una limitata dilatazione
- **Accoppiamento dinamico:**  
creare un giunto tra le due sponde della fessura resistente al taglio ed alla compressione per il ripristino della capacità di portata.

Per la progettazione e l'esecuzione dei riempimenti delle fessure si rimanda alla letteratura tecnica, tra l'altro ai punti [4.7, 4.26, 4.35, 4.36]. Per ulteriori indicazioni, comprese le dimensioni orientative del materiale, vedi i punti [4.11] e [4.34].

## 4.5 Sistemi di impermeabilizzazione

### 4.5.1 In generale

L'impermeabilizzazione duratura delle costruzioni ha avuto inizio molto tempo fa. Mentre nei secoli precedenti si utilizzavano esclusivamente materiali di impermeabilizzazione naturali come asfalto naturale, catrame e pece, oggi disponiamo di una vasta gamma di prodotti e procedure.

In riferimento alla classificazione dei sistemi di protezione stabiliti nel cap.4.2, i sistemi di impermeabilizzazione sono dei **materiali applicati sulla superficie del calcestruzzo** che possono impedire la penetrazione di sostanze - primariamente di acqua - (figura 4.36). Determinate soluzioni come ad es. per i giunti, **per i raccordi dei bordi e per impedire le penetrazioni** sono parte di questo sistema.

Mentre nel capitolo 3 vengono date delle indicazioni di progetto relative alla questione se per un determinato tipo di costruzione sia sufficiente un'opera monolitica in calcestruzzo o se sia necessario un sistema di protezione supplementare, in questo capitolo sono trattati i sistemi di impermeabilizzazione e la possibilità del loro mantenimento.

Per quanto riguarda il patrimonio edilizio e del genio civile esistente, negli ultimi decenni hanno trovato applicazione svariati materiali e sistemi. Le conoscenze relative sono in parte già andate perse. Una rielaborazione seria e continua in sede appropriata delle esperienze in questo vasto campo specialistico potrebbe contribuire al risparmio di costi ed evitare dei danni.

Anche se gli argomenti trattati nei capitoli che seguono si riferiscono ai sistemi di impermeabilizzazione delle costruzioni in calcestruzzo, gli stessi possono essere applicati anche ad altri tipi di costruzione (ad es. l'impermeabilizzazione di lastre in legno precomprese della carreggiata nella costruzione di ponti).

Ulteriori analogie possono essere parzialmente riscontrate nell'impermeabilizzazione di tetti piani di edifici. Le stesse sono comunque applicabili soltanto alla funzione dell'impermeabilizzazione mentre altre funzioni fisico-costruttive come l'isolamento termico nella costruzione di opere civili e di infrastruttura di regola non hanno alcuna importanza. Per l'applicazione sui tetti piani si rimanda pertanto alla letteratura tecnica specializzata [4.37] - [4.40].

#### 4.5.2 Tipi di sistemi di impermeabilizzazione, norme e direttive

Una **classificazione** usuale valida non è disponibile. In relazione ai materiali utilizzati esiste comunque un certo ordinamento nelle norme SIA e VSS. A questo proposito la raccomandazione SIA 272, edizione 1980, contiene dei principi ed indicazioni per la progettazione, il dimensionamento, la costruzione e l'esecuzione delle impermeabilizzazioni contro le acque sotterranee con materiali a forma di telo e impermeabilizzazioni con malta di cemento impermeabile all'acqua [4.14]. Ne consegue una classificazione grossolana delle impermeabilizzazioni **flessibili** e **rigide** come illustrato nella figura 4.36.

Con i materiali in telo menzionati nella raccomandazione si intende quanto segue:

- teli d'impermeabilizzazione bituminosi (TIB)
- teli d'impermeabilizzazione modificati con prodotti sintetici attualmente denominati teli d'impermeabilizzazione polimerici-bituminosi (TIPB)
- teli d'impermeabilizzazione in materia sintetica (TIMS)

La norma SIA 281, edizione 1983, stabilisce una suddivisione in gruppi dei teli d'impermeabilizzazione polimerici-bituminosi (vedi tabella 4.10).

La tabella 4.11 illustra un'articolazione dei vari sistemi di impermeabilizzazione.

Ulteriori indicazioni, in particolare quelle relative ai valori delle esigenze richieste ed il controllo del materiale, sono contenute nei punti [4.42] e [4.45].

Per **l'impermeabilizzazione delle lastre della careggiata nella costruzione di ponti** e sull'impermeabilizzazioni ed il rivestimento di ponti, esistono, oltre la norma SN 640 490 del VSS, la direttiva sui dettagli costruttivi dei ponti dell'Ufficio federale per le costruzioni stradali [4.46] nonché le indicazioni sulla progettazione di ponti con fondo in ghiaia delle FFS [4.47].

Nel punto [4.46] ci sono le indicazioni inerenti, in particolare, al risanamento di impermeabilizzazioni ed al rivestimento di ponti danneggiati. Nella tabella 4.12 sono riassunte le valutazioni dei diversi sistemi.

Tra l'altro, i punti [4.46] e [4.47] contengono importanti indicazioni per quanto riguarda il drenaggio, i giunti, le chiusure dei bordi e le infiltrazioni.

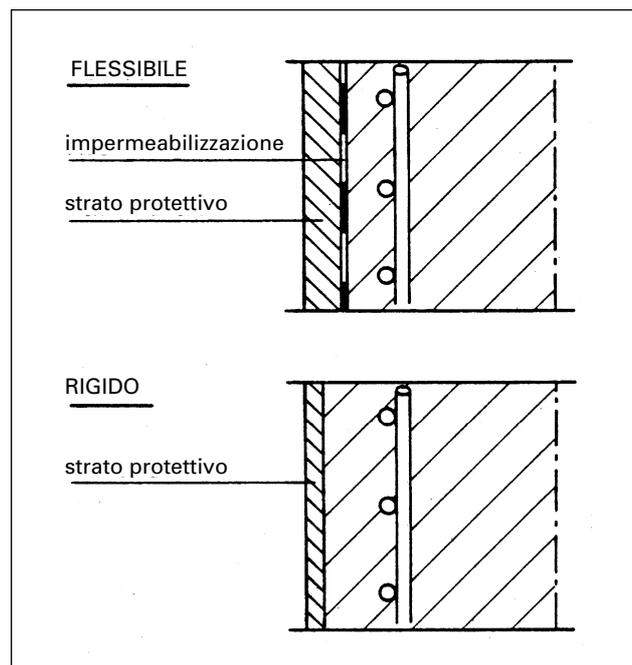


Figura 4.36 Illustrazione schematica dei tipi di impermeabilizzazione flessibili e rigidi.

Gruppo A	Teli di impermeabilizzazione polimerici-bituminosi per l'impermeabilizzazione di tetti piani
	A1 posa sotto gli strati di protezione e di carica, posa libera o incollato/saldato parzialmente o completamente con il fondo e con i singoli strati incollati/saldati tra di loro.
	A2 Posa senza gli strati di protezione e di carica. Esposti agli influssi atmosferici, fissati meccanicamente o incollati/saldati su un fondo idoneo e protetti contro le intemperie (ev. isolamento termico).
Gruppo B	Teli di impermeabilizzazione polimerici - bituminosi quale impermeabilizzazione di parti interrate sottoposte o meno a pressione idrica.
	Non esposti alle variazioni di temperatura, impermeabilizzazione incollata/saldata con il fondo sottoposto o meno a pressione idrica.
Gruppo C	Teli di impermeabilizzazione polimerici-bituminosi quale impermeabilizzazione di opere del genio civile, saldati completamente sul fondo e ricoperti con un rivestimento misto a caldo.
Attribuzioni speciali:	
tetti rovesci	
- incollati o saldati completamente	Gruppo B
- impermeabilizzazione posata liberamente	Gruppo A1
Bordure e chiusura dei bordi esposti agli influssi atmosferici	Gruppo A2

Tabella 4.10 Suddivisione dei gruppi di teli di impermeabilizzazione polimerici-bituminosi secondo settori di applicazione [4.43].

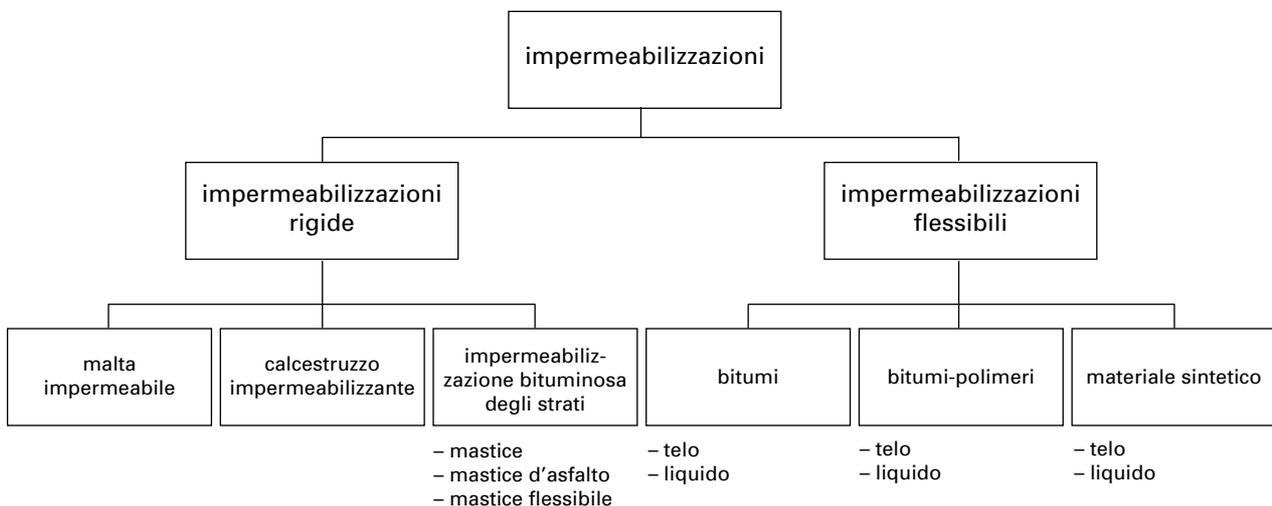


Tabella 4.11 Articolazione dei tipi di impermeabilizzazione

Impermeabilizzazione		Impermeabilizzazione flottante				Impermeabilizzazione incollata					
		mastice d'asfalto		mastice		mastice flessibile	teli d'impermeabilizzazione bituminosi	teli d'impermeabilizzazione polimerici-bituminosi	materiale sintetico 1) 2)		
strato		calcestruzzo bituminoso (cb, hmt)	mastice d'asfalto	calcestruzzo bituminoso (cb, hmt)	mastice d'asfalto	calcestruzzo bituminoso (cb, hmt)	calcestruzzo bituminoso (cb, hmt)	mastice d'asfalto	calcestruzzo bituminoso (cb, hmt)	mastice d'asfalto 3)	mastice d'asfalto
aspetto											
in generale	impermeabilizzazione multipla	●	○	●	○	●	●	○	●	○	○
	infiltrazione di fondo	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	○
	formazione di bolle	○	○	○	○	◐	◐	◐	◐	◐	◐
	resistenza all'invecchiamento	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
	possibilità di una piccola altezza d'ingombro	◐	○	◐	○	◐	◐	◐	◐	◐	○
sottofondo e strato di rivestimento	superficie di calcestruzzo con poche esigenze	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●
	capacità di riempimento delle fessure	○	○	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐
	raccordo resistente al taglio tra la superficie di calcestruzzo e l'impermeabilizzazione	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	raccordo resistente al taglio tra impermeabilizzazione e strato (strato protettivo)	○	○	○	○	○	○	◐	◐	◐	◐
	strato resistente all'usura	◐	○	◐	○	◐	◐	○	◐	○	○
posa	sollecitazione della superficie di calcestruzzo causata dal calore al momento della posa	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○
	pericolo di danneggiamento causato dalla penetrazione di particelle granulari derivanti dallo strato	○	○	○	◐	◐	○	◐	○	○	○
	dispendio in caso di raccordi	●	●	●	●	●	◐	◐	◐	◐	○
costi	costi, impermeabilizzazione e strato	◐	◐	◐	◐	○	◐	◐	◐	◐	●

Leggenda: ○ molto favorevole    ◐ favorevole    ◑ precauzione, poco favorevole    ● sfavorevole

1) su base elastomero, stato liquido, lavorazione a freddo

2) valutazione in base ad un unico prodotto

3) i teli d'impermeabilizzazione polimerici-bituminosi devono essere compatibili con il mastice d'asfalto

Tabella 4.12 Valutazione dei sistemi. Impermeabilizzazione e strato di rivestimento per le lastre della carreggiata dei ponti [4.46].

Osservazione: la valutazione indicata nella tabella secondo la quale nelle impermeabilizzazioni bituminose la resistenza al taglio del raccordo è favorevole deve essere relativizzata (vedi anche norma SIA 272). Sotto carico costante le stesse non possono assorbire le forze parallele alla superficie d'impermeabilizzazione. Di regola ciò non costituisce un problema in caso di impermeabilizzazione dei ponti. Per contro, ad es. per le volte di gallerie con carichi costanti elevati e tetti con falde a forte pendenza possono verificarsi danni molto gravi se non vengono adottati dei provvedimenti costruttivi relativi alla sicurezza di taglio.

Attualmente non esistono direttive per l'impermeabilizzazione di gallerie stradali. Nel punto [4.48] per contro, sono riassunte le riflessioni dell'Ufficio federale delle costruzioni stradali. Le stesse dimostrano che in molti casi sono previste delle impermeabilizzazioni flessibili.

Ulteriori caratteristiche di differenziazione sono:

- impermeabilizzazioni **posate liberamente o incollate completamente**
- sistemi **resistenti o meno all'acqua in pressione**
- sistemi d'impermeabilizzazione **sostituibili o non sostituibili** (event. sostituibili soltanto con un enorme dispendio)
- tipi di applicazione (vedi tabella 4.13).

Le caratteristiche di differenziazione rivestono una parte importante per il mantenimento di sistemi di impermeabilizzazione. Sistemi non sostituibili o sostituibili solo con un enorme dispendio devono essere concepiti in modo da poter garantire la funzionalità almeno durante la durata d'utilizzo prevista della costruzione.

Nelle impermeabilizzazioni **rigide** viene sfruttata la proprietà del calcestruzzo di essere impermeabile. Nell'applicazione ad es. in vasche per l'acqua di falda (denominate «vasche bianche») nei tunnel, nelle gallerie e nei serbatoi l'elemento costruttivo medesimo in cemento armato può assumere, accanto alla funzione statica, anche quella di impermeabilizzazione.

L'elemento costruttivo nel suo complesso deve essere progettato, calibrato, sviluppato costruttivamente ed eseguito a regola d'arte in modo da assicurare le condizioni di impermeabilità. Contro la penetrazione di acqua sono importanti sia un calcestruzzo compatto che fessure con larghezze ridotte. Ulteriori indicazioni si trovano nei punti [4.62] - [4.64].

In relazione alla progettazione di **giunti, alla chiusura dei bordi** ed alla **penetrazione** la pluralità di concetti e sistemi è probabilmente ancora maggiore di quelli inerenti all'impermeabilizzazione «in piano». In questa sede non è possibile una trattazione più approfondita. Si rimanda al punto [4.49] che può valere come costruzione standard. La tabella 4.14 dà inoltre una visione sulle chiusure dei bordi in caso di presenza di teli in materiale sintetico.

	Mastice d'asfalto / mastice	Teli d'impermeabilizzazione bituminosi (IB)	Teli d'impermeabilizzazione polimerici - bituminosi (TIPB)	Teli d'impermeabilizzazione in materia sintetica (TIMS)	Materia sintetica liquida (MSL)
<b>Vasche per le acque di falda</b> <i>non aderente:</i> – appoggiato liberamente (saldatura continua con fissaggio ai bordi)  <i>aderente su tutta la superficie:</i> – bitume a caldo – scriccatura alla fiamma – collante a freddo (saldatura continua) – iniezione – rullatura, patinatura		X	X	X	
<b>Tunnel</b> – appoggiato liberamente (saldatura continua con fissaggio meccanico)				X	
<b>Ponti</b> <i>non aderente:</i> – flottante (con incollatura ai bordi)  <i>aderente a piena superficie:</i> – bitume a caldo – scriccatura alla fiamma – iniezione – rullatura, patinatura	X	X	X		X X
<b>Tetto piano</b> <i>non aderente:</i> – flottante (con incollatura ai bordi) – appoggiato liberamente (saldatura continua con fissaggio ai bordi)  <i>aderente a piena superficie:</i> – bitume a caldo – scriccatura alla fiamma – collante a freddo (saldatura continua) – iniezione – rullatura, patinatura	X	X	X	X	X X

Tabella 4.13 Tipi di applicazione dell'impermeabilizzazione.

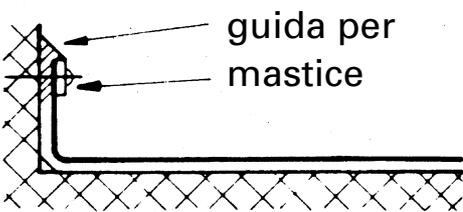
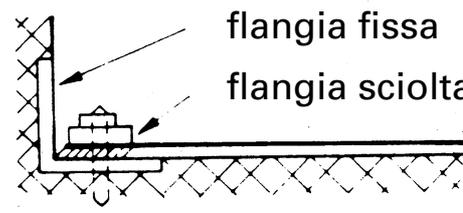
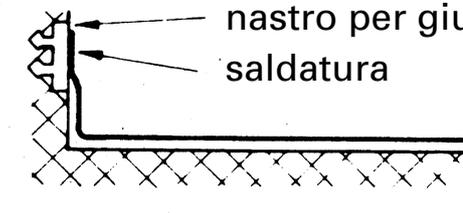
Tipo	Dettagli	Applicazione		
		vasche per acqua di falda	tunnel	galleria
A guida per mastice	 guida per mastice mastice	○	●	●
B guida per fissaggio	 event. mastice flangia	●	●	○
C flangia per fissaggio	 flangia fissa flangia sciolta	●	○	○
D nastro d'impermeabilizzazione in PVC per giunti	 collante epossidico nastro in PVC	●	●	●
E nastro per giunti	 nastro per giunti saldatura	○	●	○

Tabella 4.14 Chiusura dei bordi nelle impermeabilizzazioni con teli in materiale sintetico

○ campo d'applicazione possibile ● campo d'applicazione

#### 4.5.3 Resistenza e durata di vita

Conoscenze, più o meno attendibili, sull'importante questione della resistenza e durata di vita dei sistemi di impermeabilizzazione esistono soltanto per alcuni tipi di applicazione.

Accanto all'invecchiamento naturale dei materiali utilizzati la durata di vita delle impermeabilizzazioni è determinata dai seguenti fattori di rischio:

- tipo e qualità del sistema, tipo di struttura del fondo e dello strato di protezione
- stabilità delle qualità del materiale
- qualità di esecuzione
- modalità ed intensità degli effetti derivanti dall'utilizzo e causati dall'ambiente
- manutenzione (possibile soltanto in casi particolari).

La complessità della problematica è dimostrata dall'analisi sui punti deboli nel caso di impermeabilizzazione di tetti piani presentata nella tabella 4.15.

Risulta inoltre confermato che di regola, i problemi interessano i giunti, le chiusure dei bordi e le penetrazioni.

Sulla questione della durata di vita nel punto [4.50] è indicato quanto segue:

«Una valutazione obiettiva della **durata di vita** naturale di un'impermeabilizzazione di un tetto piano inghiaiato eseguita in base allo stato attuale della tecnica e sottoposto a condizioni di vita «normali», può dare dei **valori medi di 30-40 anni**, con probabili differenze tra impermeabilizzazioni bituminose e impermeabilizzazioni con materiale sintetico ininfluenti».

Nel punto [4.57] la situazione viene valutata con meno ottimismo, considerando una durata di vita di 20 anni come già eccezionale. La maggior parte delle impermeabilizzazioni eseguite sui tetti piani devono essere sostituite o rinnovate già dopo 7 - 17 anni, quindi chiaramente insufficiente in rapporto al prezzo ed alle promesse fatte.

Per ottenere delle informazioni sul comportamento di impermeabilizzazioni **di vasche per le acque di falda situate nei piani sotterranei di edifici** e in **costruzioni interrato** il gruppo di lavoro tecnologie del PI EDIL si è messo in contatto con alcune ditte con grandi proprietà immobiliari. Il risultato di questa inchiesta può essere riassunto come segue:

- le anemeticità dovute, tra l'altro, ad un'esecuzione non a regola d'arte delle impermeabilizzazioni, si verificano subito dopo l'inizio della penetrazione di acqua. Il risanamento è effettuato mediante iniezioni; in casi particolari anche tramite sinterizzazione spontanea delle fessure o con la posa di giunti idonei.
- Su danni a lungo termine per impermeabilizzazioni progettate ed eseguite a regola d'arte non si ha alcuna conoscenza. Più tardi, per contro, si verificano delle anemeticità nei giunti con una permanente dilatazione. Non esistono comunque osservazioni statisticamente rilevanti a questo proposito. L'analogia con i risultati delle analisi sui giunti di gallerie stradali con un aumento della frequenza di danni dopo 10-15 anni, non può tuttavia essere ignorata (vedi figura 3.16).

L'impermeabilizzazione nella **costruzione di ponti** è sostituibile. Con un ulteriore aumento del volume di traffico la sostituzione diventerà un problema economico perchè costosa e molto impegnativa dal lato tecnico. Secondo [4.53] in Svizzera si può contare su una durata di vita media di 25 anni. Nuove conoscenze depongono comunque a favore di 20 anni. In Germania è stata accertata una durata media di vita di 15 anni. I problemi iniziano quasi sempre dalle chiusure dei bordi dove i danni possono verificarsi molto prima. Nel caso di impermeabilizzazioni interamente o parzialmente incollate alla soletta della carreggiata gli effetti dannosi sono circoscritti localmente. Nelle impermeabilizzazioni posate liberamente o flottanti ciò non risulta.

Potenziati punti deboli	dove	Prevenzione e rimedi
sovrasollecitazione dell'impermeabilizzazione sopra le giunture delle lastre in espanso rigido	TIB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- strato di separazione</li> <li>- provvedimenti sull'isolamento termico (scelta del materiale; incollato su tutta la superficie, ecc.)</li> </ul>
danneggiamento meccanico dell'impermeabilizzazione durante la fase costruttiva o d'utilizzo	TIMS + TIB + TIPB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- scelta di un'impermeabilizzazione con una maggiore garanzia contro la perforazione</li> <li>- strati di protezione</li> <li>- rivestimento sugli strati di scorrimento con giunti di delimitazione sufficienti</li> <li>- controlli</li> <li>- precauzione in caso di installazioni successive!</li> </ul>
conservazione di lamiere - corrosione  - giunti saldati  - dilatazione termica  - giunti stuccati	TIB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bordature con teli d'impermeabilizzazione polimerici-bituminosi invece che con lamiere angolari</li> <li>- scelta del materiale, protezione contro la corrosione</li> <li>- cartoni di appoggio</li> <li>- tecnica di assemblaggio (corrosione della sezione di taglio)</li> <li>- controlli</li> <li>- quantità, posizionamento e progettazione degli elementi costruttivi di dilatazione idonei</li> <li>- scelta del materiale</li> <li>- controlli e rinnovamenti periodici</li> </ul>
penetrazione di radici	TIB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- impermeabilizzazione resistente alla penetrazione delle radici (polimerici-bituminosi o materiale sintetico)</li> <li>- strato di protezione senza sabbia</li> <li>- pendenza continua per evitare la stagnazione delle acque</li> <li>- manutenzione</li> </ul>
deformazione dell'impermeabilizzazione (accorciamento)	TIMS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- scelta di un'impermeabilizzazione che risponda alla norma di controllo «deformazione da calore» e che non sia soggetto ad un ritiro inammissibile dovuto all'invecchiamento</li> <li>- compatibilità con i materiali a contatto</li> <li>- posa senza precompressione</li> <li>- assicurazione meccanica della bordatura</li> </ul>
drenaggio del tetto	TIB + TIPB + TIMS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pendenza continua</li> <li>- almeno due scarichi, cioè uno scarico ed uno sfioratore di emergenza</li> <li>- diametro minimo dei tubi di scarico 80 mm</li> <li>- bocchettoni sicuri contro il ristagno</li> <li>- tubazioni non trascinate</li> <li>- strati d'uso che non possono essere dilavati e liscivati</li> <li>- manutenzione (ad es. togliere il fogliame)</li> </ul>

TIB: soprattutto nei teli d'impermeabilizzazione bituminosi  
TIPB: soprattutto nei teli d'impermeabilizzazione polimerici-bituminosi  
TIMS: soprattutto nei teli d'impermeabilizzazione in materiale sintetico

Tabella 4.15 Analisi dei punti deboli in sistemi d'impermeabilizzazione nei tetti piani [4.50].

La problematica della penetrazione delle radici è presente anche nel caso di un'impermeabilizzazione eseguita in teli d'impermeabilizzazione polimerici-bituminosi e materiale sintetico. Per questi materiali è raccomandabile la prova di resistenza alla penetrazione delle radici ai sensi delle norme SIA 280 e 281.

Per il controllo dei sistemi d'impermeabilizzazione la norma SIA 281, attualmente in revisione, prevede la procedura secondo la FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e. V., Bonn) (vedi bozza N. 5276-13\* della norma SIA 281).

In Germania è stata eseguita una ricerca approfondita sulle impermeabilizzazioni di carregiate nei ponti in calcestruzzo [4.54]. Per l'accertamento dell'efficacia dei tipi di impermeabilizzazione usuali gli stessi sono stati analizzati in 99 ponti. Nella tabella 4.16 è illustrato il programma. La maggior parte delle costruzioni analizzate erano ponti autostradali con un primo rivestimento eseguito a regola d'arte ed un età compresa tra i 6 e 10 anni. I sistemi d'impermeabilizzazione erano costituiti da teli bituminosi ad uno o due strati, da asfalto sabbioso, da impermeabilizzazioni in materiale sintetico liquido in poliuretano, da mastice d'asfalto in diverse variazioni e da nastri in metallo su teli bituminosi in lana di vetro perforata.

In merito a questa ricerca tedesca utilizzata in questa sede in assenza di ricerche analoghe in Svizzera, si impongono alcune osservazioni introduttive. Le varianti tedesche «teli d'impermeabilizzazione bituminosi a due strati», «nastri in metallo striati su teli d'impermeabilizzazione di lana di vetro» e «asfalto sabbioso» probabilmente non sono mai state utilizzate in Svizzera. La valutazione di queste varianti è quindi stata tralasciata nel riassunto dei risultati.

Fino all'apparire dei teli d'impermeabilizzazione polimerici-bituminosi, in Svizzera l'impermeabilizzazione dei ponti, è stata quasi sempre eseguita con mastice elastico, con rivestimenti in catrame epossidico o mastice d'asfalto flottante con colata dei bordi. Il mastice elastico corrisponde grosso modo al «mastice con un alto contenuto legante» e l'impermeabilizzazione con mastice d'asfalto flottante al «mastice con un contenuto legante normale» tedeschi.

Dopo l'apparizione sul mercato svizzero dei teli d'impermeabilizzazione polimerici-bituminosi, ponti ed oggetti simili sono stati impermeabilizzati prevalentemente con questo materiale. Un ruolo, anche se secondario, hanno comunque ancora le impermeabilizzazioni in materiale sintetico liquido, i teli d'impermeabilizzazione bituminosi metallizzati o il mastice d'asfalto flottante con incollatura dei bordi. L'impermeabilizzazione con teli polimerici-bituminosi metallizzati può essere paragonata al «telo bituminoso saldato ad un strato» tedesco.

Systema costruttivo dell'impermeabilizzazione	numero di ponti esaminati
Teli bituminosi saldati ad uno strato – esecuzione normale attuale – sulla superficie di calcestruzzo trattata con resina reattiva	21 6
Teli d'impermeabilizzazione bituminosi a due strati – esecuzione normale attuale – sulla superficie di calcestruzzo trattata con resina reattiva	13 2
Mastice con un contenuto legante normale – sullo strato di separazione (lana di vetro) con rinforzo dei bordi – sullo strato di separazione (lana di vetro) senza rinforzo dei bordi – su tessuti reticolati in fibra di vetro ed isolante bituminoso con rinforzo dei bordi – su tessuti reticolati in fibra di vetro senza isolante bituminoso con rinforzo dei bordi – su superficie in calcestruzzo trattata con resina reattiva senza strato di separazione (lana di vetro) – su superficie in calcestruzzo trattata con resina reattiva con strato di separazione (lana di vetro)	4 7 0 6 1 9
Mastice con un contenuto legante elevato – su tessuto reticolato in fibra di vetro e isolante bituminoso con rinforzo dei bordi – su tessuto reticolato in fibra di vetro e isolante bituminoso, senza rinforzo dei bordi	0 4
Nastri striati in metallo su teli d'impermeabilizzazione bituminosi in lana di vetro perforata – acciaio nobile – rame	5 8
Asfalto sabbioso – esecuzione normale attuale – su superficie di calcestruzzo trattata con resina reattiva	7 0
Materiale sintetico liquido – poliuretano – altro	4 2
<b>Somma</b>	<b>99</b>

Tabella 4.16 Sistemi di impermeabilizzazione di ponti [4.54].

I risultati di questa ricerca sono riassunti nel punto [4.54] nel modo seguente:

«I tipi costruttivi d'impermeabilizzazione incollati in piano con la superficie in calcestruzzo eseguiti con **teli d'impermeabilizzazione bituminosi ad uno o due strati**, esaminati in 42 manufatti, si sono dimostrati efficaci. Nei teli saldati placcati con alluminio ad uno strato combinati con uno strato protettivo in mastice d'asfalto su un isolamento bituminoso del calcestruzzo nella massa incollante si è potuto osservare, nella maggior parte dei pezzi asportati, la formazione di bollicine superficiali (coppe). All'indebolimento conseguente dello strato d'impermeabilizzazione e dell'aderenza alla base, può essere posto rimedio in modo efficace mediante una mano di fondo, un'impregnazione o uno sgraffito della superficie in calcestruzzo con resina epossidica reattiva.

Le **impermeabilizzazioni in materiale sintetico liquido** in poliuretano proteggono efficacemente contro l'umidità e sostanze aggressive e dovrebbero essere utilizzati maggiormente in futuro. A questo riguardo si raccomanda di limitare allo stretto necessario la quota delle componenti estraibili dal poliuretano per evitare effetti indesiderati dovuti al distacco del mastice d'asfalto sul lungo termine. Inoltre il contenuto in vuoti dello strato d'impermeabilizzazione non dovrebbe superare il 10-15%.

La predisposizione alla insorgenza di danni in sistemi d'impermeabilizzazione con uno strato di separazione contro l'espansione della tensione di vapore già conosciuta, è stata confermata anche in questa ricerca.

Assolutamente insoddisfacente si è dimostrato il sistema costruttivo con **mastice d'asfalto sullo strato di separazione** (quasi sempre lana di vetro). In 6 rivestimenti su 7 è stata riscontrata un'anermeticità, delle infiltrazioni di fondo e contenuti elevati di cloruro nel calcestruzzo. Un motivo dell'infiltrazione nel mastice d'asfalto sullo strato di separazione è rappresentato dallo strappamento dello stesso nel raccordo in corrispondenza delle cappe. Sono quindi stati esaminati 10 rivestimenti eseguiti con mastice sullo strato di separazione (lana di vetro o tessuti reticolati in fibra di vetro) rinforzati in questo giunto d'angolo con l'introduzione di un nastro di rame striato a livello dello strato d'impermeabilizzazione per meglio valutare l'effetto di questa modifica. Il comportamento dell'impermeabilizzazione è risultato migliore rispetto al sistema costruttivo senza rinforzo dei bordi, ma anche in questo caso si sono riscontrati dei cloruri estranei. La predisposizione ai

danni sui giunti d'angolo è attenuata attraverso un rinforzo; le anermeticità causate ad es. da fessure nel rivestimento sempre possibili, determinano tuttavia un'infiltrazione di fondo.

L'infiltrazione di fondo nel mastice d'asfalto sullo strato di separazione in lana di vetro si manifesta conseguentemente anche nella variante costruttiva, in cui la superficie di calcestruzzo è stata preventivamente sigillata con resina epossidica. Dalla ripartizione della frequenza dei contenuti di cloruro si è potuto desumere che la sigillatura contribuisce alla protezione del calcestruzzo ma non elimina le carenze fondamentali dello strato d'impermeabilizzazione. Questo tipo di costruzione con tutte le varianti non dovrebbe più essere eseguito.

Influssi significativi di sistemi costruttivi dello strato d'impermeabilizzazione sul comportamento del rivestimento non si sono potuti riscontrare. I mastici d'asfalto avevano quasi esclusivamente una struttura compatta. Il calcestruzzo bituminoso come strato d'impermeabilizzazione presentava ogni tanto delle deficienze strutturali come stato di porosità, distacchi del legante e perfino il parziale scioglimento dello stesso. La combinazione dello strato di protezione in calcestruzzo bituminoso e dello strato di copertura in mastice d'asfalto determina sovente una notevole formazione di bolle sulla superficie di rivestimento.

In base ai risultati delle ricerche si raccomanda come regola di scegliere tra i sistemi d'impermeabilizzazione oggi utilizzati quelli con teli saldati ad uno strato con uno strato di protezione in mastice d'asfalto e, a seconda del caso, con teli d'impermeabilizzazione bituminosi a due strati con uno strato protettivo in calcestruzzo bituminoso. In entrambi i casi è necessario, a secondo dello stato della superficie della lastra della careggiata in calcestruzzo, un'applicazione di fondo, una sigillatura o graffiatura con resina epossidica reattiva. Misurazioni della resistenza effettiva della base sigillata non sono indispensabili.

In futuro anche il terzo sistema d'impermeabilizzazione con uno strato in materiale sintetico liquido accompagnato da uno strato protettivo in mastice d'asfalto, dovrebbe essere tenuto in considerazione.

Le impermeabilizzazioni in mastice con elevato contenuto legante in tessuti reticolati in fibra di vetro e con un incollamento verso la base dovrebbero essere utilizzate soltanto in casi particolari e solo se lo strato d'impermeabilizzazione può essere posato con uno spessore uniforme controllabile a posteriori ed alle condizioni di utilizzare un

materiale perfettamente identificabile; come strato protettivo sopra quello d'impermeabilizzazione dovrebbe essere utilizzato soltanto mastice d'asfalto.

Tutti i sistemi costruttivi d'impermeabilizzazione con uno strato di separazione non dovrebbero più essere utilizzati. Le impermeabilizzazioni in mastice sullo strato di separazione senza isolante bituminoso hanno un effetto protettivo limitato e per assicurare la stabilità dei ponti le stesse dovrebbero essere rinnovate per tempo».

Sulle esperienze fatte in Svizzera nell'impermeabilizzazione di ponti non esistono, come già osservato, delle ricerche complete. In base ad informazioni di singoli si possono determinare valori d'esperienza circa l'idoneità delle varianti svizzere di impermeabilizzazione dei ponti:

- I «mastici elastici», «i rivestimenti in catrame epossidico» ed «i mastici d'asfalto flottanti con colata dei bordi» denotano un comportamento non omogeneo, in altri termini si sono realizzate sia delle opere ermetiche che anermetiche.
- Teli d'impermeabilizzazione bituminosi placcati in metallo sono stati utilizzati per alcuni anni come impermeabilizzazione sotto il mastice d'asfalto fino alla comparsa dei TIPB resistenti al mastice d'asfalto. Le esperienze fatte sono paragonabili a quelle indicate nel punto [4.54].  
A questo punto va osservato che anche in Germania lo sviluppo va in direzione dei TIPB resistenti al mastice d'asfalto, tenendo comunque conto del fatto che, indipendentemente dal tipo dello strato d'impermeabilizzazione, viene richiesto l'impiego di una graffiatura in resina epossidica sulla platea di calcestruzzo.
- Le impermeabilizzazioni con teli d'impermeabilizzazione polimerici-bituminosi hanno dato dei buoni risultati, salvo nei raccordi ai margini del ponte, nei punti di transizione della carreggiata o in altre parti particolari, rivelatisi come potenziali punti deboli. Ciò vale di conseguenza anche per le impermeabilizzazioni in «mastice d'asfalto flottante con incollatura dei bordi».  
In base a queste conoscenze si sono sviluppate delle ricerche, sia da parte di privati che da parte di enti pubblici, intese a sviluppare alcune varianti di fissaggio dell'impermeabilizzazione in corrispondenza dei bordi sia di tipo meccanico che per mezzo di collanti. Anche se alcune di queste sono eseguite da anni, la dimostrazione della loro efficacia sul lungo termine deve ancora essere provata.
- I materiali sintetici liquidi per l'impermeabilizzazione di ponti vengono utilizzati in Svizzera

da oltre 10 anni. Questi materiali sintetici liquidi sono composti prevalentemente da poliuretani (PUR). Le esperienze fatte con gli stessi in relazione alla funzione protettiva ed efficacia dell'impermeabilizzazione sono generalmente positive.

Quale potenziale punto debole dei materiali sintetici liquidi è da segnalare la permeabilità al vapore acqueo che, assieme allo sviluppo di bolle nella fase di posa del mastice, può portare ad una formazione successiva di bolle nel mastice d'asfalto a tenuta di vapore.

Da alcuni anni è in corso in Svizzera un **programma di ricerca applicata per i raccordi dei bordi** in relazione all'impermeabilizzazione di ponti in teli d'impermeabilizzazione polimerici-bituminosi TIPB [4.55].

L'esame dei diversi raccordi delle bordure e margini, di zone di transizione delle carreggiate e di pozzi ed opere di presa, avviene su ponti selezionati. Dopo la conclusione della ricerca nel 1992 dovrebbero essere disponibili le informazioni concrete sull'idoneità dei diversi dettagli di raccordo sia per le nuove impermeabilizzazioni che per quelle esistenti.

Le impermeabilizzazioni delle **gallerie** di regola **non sono sostituibili**. È quindi proficuo un investimento sufficiente di mezzi sia nella progettazione che nell'esecuzione degli stessi. Nel punto [4.56] si può constatare che anche nel caso di impermeabilizzazioni molto costose gli investimenti relativi non superano il 2-4 per cento dei costi complessivi. I costi di risanamento di una costruzione esistente in caso di impermeabilizzazione difettosa o mancante possono per contro, ammontare fino al 50 per cento di quelli complessivi.

La tabella 4.17 mostra attraverso un esempio di impermeabilizzazione di un tunnel con teli d'impermeabilizzazione in materiale sintetico, la correlazione tra manchevolezze, la loro eliminazione e la competenza degli attori interessati.

Nel punto [4.18] è trattata la problematica dei danni in gallerie della rete delle strade nazionali. È comunque peccato che sulle esperienze e danni nelle impermeabilizzazioni di gallerie in Svizzera non esistono delle ricerche globali. Un siffatto rapporto potrebbe contribuire ad evitare ulteriori errori. Nelle gallerie con scavo a giorno completamente rivestite con un sistema di impermeabilizzazione flessibile i cedimenti del materiale di riempimento hanno determinato, in alcuni casi, lo strappo dei film e dei teli sulle pareti laterali. Per questo motivo, in Germania, le impermeabilizzazioni delle pareti sono state, ad es., protette da questi danni mediante murature antistanti.

Possibile difetto	Eliminazione	Competenza
<b>Fabbricazione</b> difetto di fabbricazione (ondulazioni, cavità da ritiro, delaminazione) perforazione su fondo troppo rugoso sollecitazione di trazione su fondo fortemente irregolare difetto di saldatura	controllo di fabbrica controllo di laboratorio asportazione del fondo posa dei TIMS negli incavi, riequilibrio eventuale degli stessi con calcestruzzo ad iniezione controllo dei giunti saldati sul cantiere, allestimento di un verbale di controllo	produttore istituto di controllo ditta di impermeabilizzazione ditta di impermeabilizzazione impresario ditta di impermeabilizzazione direzione dei lavori
<b>Particolarità dovute alla fase di cantiere</b> danno dovuto all'armatura dell'anello interno danno dovuto all'introduzione di armature danno dovuto all'introduzione del calcestruzzo strappamento dei TIMS in caso di formazione di sacche d'acqua danneggiamento dopo gettata di calcestruzzo in caso di cavità molto grandi (strappo dei TIMS causato dalle sacche d'acqua) perforazione dovuta alle forze di pressione e di spinta causate dalle pressioni orogenetiche, dell'acqua e del calcestruzzo	nastro protettivo con TIMS posa di strati protettivi e di segnalazione nessun sottoprofilo soprattutto nei settori d'appoggio, piano smorzatore e sfiatatoi tagliare e saldare nuovamente immediatamente prima della gettata di calcestruzzo iniettare completamente le cavità immediatamente dopo la gettata di calcestruzzo dell'anello interno, strato di compensazione e telo d'impermeabilizzazione dimensionati adeguatamente	impresario ditta di impermeabilizzazione impresario ditta di impermeabilizzazione impresario direzione dei lavori progettista
<b>Effetti a lungo termine</b> comportamento a lungo termine dei TIMS ostruzione e sinterizzazione del drenaggio in piano dietro i TIMS ostruzione e sinterizzazione delle tubazioni di drenaggio	controllo di laboratorio secondo norme SIA e DIN strato di compensazione adeguatamente dimensionato con la massima efficacia della durata del drenaggio tubazioni di drenaggio con un foro d'ingresso massimo possibile dimensionate in modo adeguato, sistemare a breve distanza dei pozzi di controllo e di pulizia risciacquare periodicamente le tubazioni di drenaggio	istituto di controllo progettista progettista servizio di manutenzione

Tabella 4.17 Difetti / eliminazione / competenze con un esempio di impermeabilizzazione di ponti con teli d'impermeabilizzazione in materiale sintetico [4.56].

#### 4.5.4 Controllo e manutenzione

Colpisce il fatto come riflessioni e strategie solitamente fatte negli altri settori della tecnica di costruzione sulla problematica del controllo e della manutenzione dei sistemi di impermeabilizzazione trovano scarsa applicazione. È pensabile che ciò cambierà nei prossimi anni soprattutto nel settore delle infrastrutture per il traffico.

La citazione [4.56] in merito alla questione della garanzia che segue dimostra l'esistenza di una situazione insoddisfacente:

«Spesso nell'ambito delle discussioni con i venditori, si utilizza il concetto di garanzia. Il committente dovrebbe però essere in chiaro sul fatto che un'effettiva praticabilità della garanzia ai sensi delle norme SIA per le impermeabilizzazioni in costruzioni civili è possibile solo in casi rari. L'opera dell'impresa che ha eseguito l'impermeabilizzazione è spesso non più accessibile ed un danno è ipotizzabile soltanto in base alla comparsa di un'infiltrazione. Questo danno non può essere eliminato direttamente, una prestazione di garanzia sotto forma di riparazione dell'opera può essere soddisfatta soltanto indirettamente, perchè i lavori di apertura solitamente necessari porterebbero alla distruzione completa dell'opera. È quindi necessario procedere con cautela quando si parla del concetto di garanzia per evitare costosi strascichi tecnici e giuridici».

Ci si può quindi domandare se in futuro non si impongano dei sistemi che, oltre alla garanzia di qualità in modo da evitare dei danni, da un lato rendano possibile **un controllo dell'efficacia durante l'esecuzione fino al collaudo, messa in esercizio e durante tutta la durata d'utilizzo, e dall'altro includano strategie che permettano l'eliminazione di anemeticità che si dovessero presentare più tardi**. Queste strategie sarebbero di grande utilità soprattutto nei casi in cui l'acqua è in pressione.

Un passo in questa direzione è costituito da un procedimento di controllo e di iniezione che si basa sull'analisi dei vuoti in teli d'impermeabilizzazione in materiale sintetico a due strati con possibilità, se necessario, di iniettare con mastice le cavità liberate dalla ghiaia [4.56].

In riferimento alla **sorveglianza** rispettivamente **all'analisi** delle impermeabilizzazioni esistenti si trovano delle indicazioni, tra l'altro, nei punti [4.58] e [4.59]. Oltre al controllo visuale esistono altri procedimenti ed in particolare l'analisi termografica a raggi infrarossi e georadar.

Nel punto [4.60] è illustrato un nuovo metodo per la ricerca di perdite nelle impermeabilizzazioni di ponti. Questo metodo per la localizzazione di punti difettosi utilizza il Tracer gas SF<sub>6</sub>. Lo stesso è stato sviluppato e analizzato su diverse piastre-campione e su un ponte (figure 4.37 e 4.38). Il gas viene compresso nelle fessure sul lato inferiore del ponte in cui si notano delle fuoriuscite di acqua. Il gas penetra nei punti di rottura dell'impermeabilizzazione e si diffonde in tutta la pavimentazione della carreggiata.



Figura 4.37 Localizzazione della perdita con il Tracer gas [4.60].

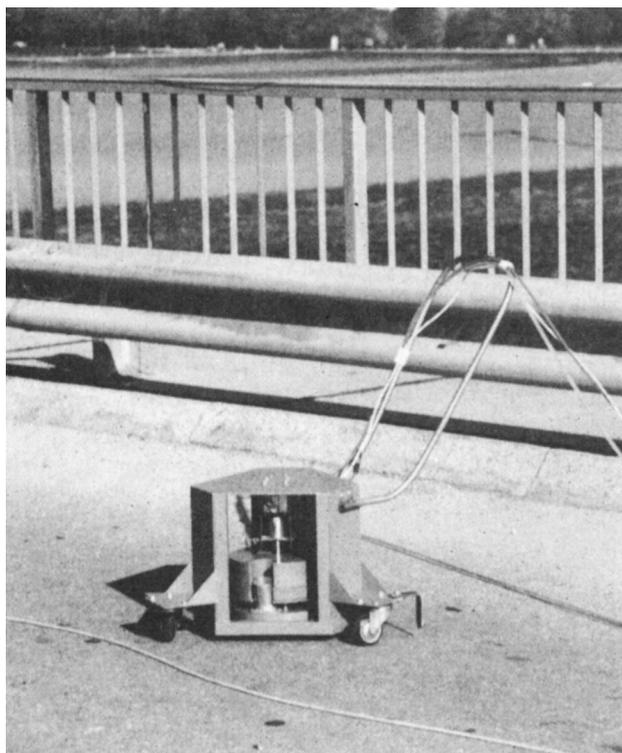


Figura 4.38 Apparecchio mobile per la raccolta di campione [4.60].

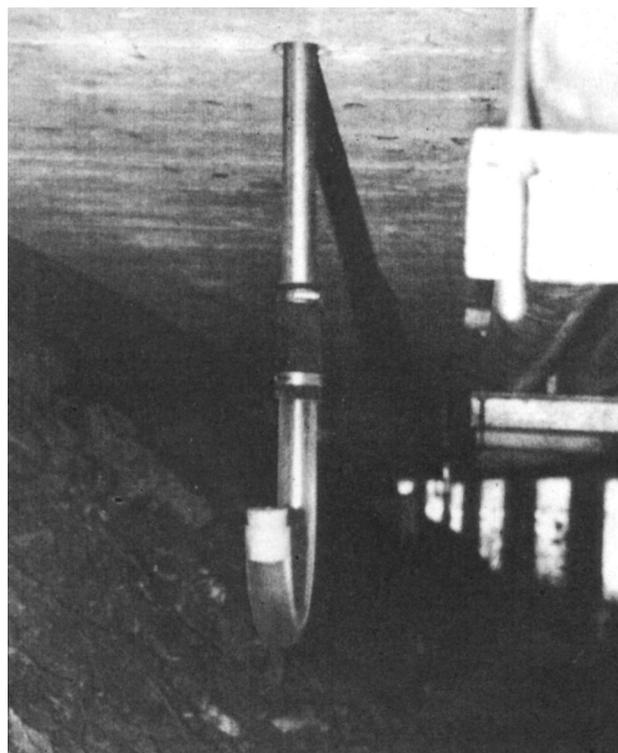


Figura 4.39 Tubi in plexiglas per il controllo visuale della fuoriuscita d'acqua nelle impermeabilizzazioni di ponti annermetici [4.55].

Sulla superficie viene misurata la distribuzione della concentrazione del gas di controllo. Va tenuto conto del fatto che in presenza di materiale abbastanza omogeneo sopra ai punti difettosi si mantiene un massimo di concentrazione di gas. Sfruttando la possibilità offerta dal Tracer gas SF<sub>6</sub> di circoscrivere le zone del ponte da risanare, si può riparare una perdita con iniezioni di resina sintetica senza asportazione della pavimentazione della carreggiata evitando quindi costosi lavori di ripristino e ostacoli allo scorrimento del traffico per periodi prolungati. Anche mediante mezzi semplici è possibile controllare se le impermeabilizzazioni ed i punti di raccordo della impermeabilizzazione sono funziona-

li. Nei punti più bassi delle solette dei ponti si realizzano delle aperture di controllo attraverso l'inserimento di un tubo in materia sintetica nell'armatura o tramite un carotaggio dalle quali può fuoriuscire l'acqua penetrata nel punto difettoso. Con l'applicazione di un tubo ricurvo in plexiglas installato nell'apertura di controllo, la sorveglianza visuale può essere facilitata [figura 4.39]. Anche i fori nel giunto dell'armatura possono essere utilizzati per scopi di controllo. Fuoriuscite d'acqua in corrispondenza dei fori sono segni chiari che l'impermeabilizzazione o i relativi raccordi sono difettosi. Nel caso di impermeabilizzazioni incollate, ciò rappresenta anche il segnale che i teli di IB o di IPB presentano delle infiltrazioni di fondo.

Nell'ambito della manutenzione sia **costruttiva** che **funzionale** le possibilità di controllo e di manutenzione sono limitate ai casi in cui i **sistemi di impermeabilizzazione non sono più accessibili**.

Se esiste un drenaggio le tubazioni devono essere periodicamente risciacquate e le aperture di entrata pulite. Ciò vale anche per sistemi d'impermeabilizzazione accessibili.

Se si verificano dei danni nei sistemi d'impermeabilizzazione non più accessibili, cioè non più sostituibili, gli stessi, anche con investimenti elevati, **sono difficilmente eliminabili**, soprattutto se si è in presenza **di acqua in pressione**.

Se non è possibile impedire l'ingresso d'acqua, di regola come unica soluzione possibile, rimane l'applicazione di un sistema di impermeabilizzazione sulla parte interna dell'opera.

La **chiusura di fessure con penetrazioni d'acqua e larghezza costante** nel calcestruzzo e di **altri punti anermetici** può essere eseguita con iniezioni e stuccatura.

I **giunti di lavoro anermetici** con e senza nastri di giuntura, vengono iniettati in modo identico alle fessure con penetrazioni d'acqua (vedi cap. 4.4.8).

**Fessure con una larghezza variabili** a causa di carichi esterni ed influssi atmosferici non possono, nella maggior parte dei casi, essere impermeabilizzate **in modo duraturo**. La figura 4.40 mostra tre possibilità. Queste riparazioni sono generalmente molto costose.

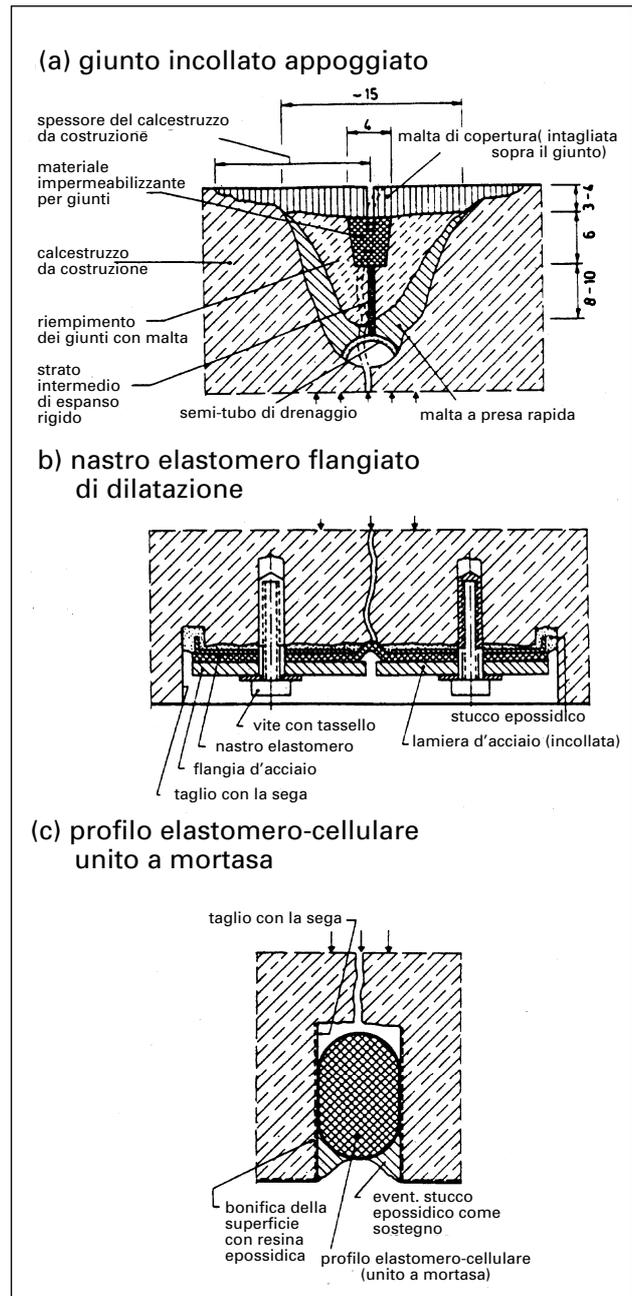


Figura 4.40 Possibilità d'impermeabilizzazione di una fessura prodottasi a posteriori con una larghezza variabile [4.49].

**L'impermeabilizzazione a posteriori di giunti di dilatazione** può rendersi necessaria a causa dei seguenti motivi [4.49]:

1. calcestruzzo poroso compresso in modo insufficiente in corrispondenza del nastro di giuntura.
2. Nastri di giuntura non sufficientemente annessi nel calcestruzzo a causa di una cattiva fissazione nella cassaforma (orecchiette piegate) o di nervature deformate, ad es. nel caso di nastri di giuntura esterni.
3. Nastri di giuntura danneggiati ad es. nella fase di costruzione o di sovrassollecitazione (dilatazioni ed acqua in pressione troppo forti)
4. Materiali di giuntura instabili.

Nel **primo caso** si cercherà di impermeabilizzare con iniezione il calcestruzzo insufficientemente ermetizzato in corrispondenza del nastro di giuntura. È possibile applicare il procedimento indicato nella figura 4.41. In questo caso il materiale di riempimento della giuntura viene tolto sul lato a contatto con l'aria e la stessa richiusa su tutta la lunghezza con un tubo flessibile in materiale sintetico. Attraverso la chiusura a tubo del giunto vengono inseriti tubetti d'iniezione e d'espansione; il tutto assicurato con cemento a presa rapida o malta di resina epossodica per sopportare la pressione necessaria per l'iniezione. In seguito viene iniettata resina di poliuretano o acrilica nello spazio del giunto. Nei giunti di dilatazione avvolgenti ad anello, l'impermeabilizzazione con il tubo flessibile inserito è di semplice esecuzione (figura 4.41a). Caso contrario il tubo flessibile inserito deve essere collocato all'esterno della zona di risanamento nelle vicinanze del nastro di giuntura ed impermeabilizzato provvisoriamente in modo da formare un vuoto che genera la pressione d'iniezione (figura 4.14b). In questa procedura di impermeabilizzazione è importante l'uso di una resina deformabile termoindurente in modo da non limitare eccessivamente la possibilità di dilatazione del giunto. Nel **secondo caso** la procedura d'impermeabilizzazione citata può portare in molti casi anche ad un'impermeabilità del giunto duratura. Nel caso in cui il nastro per giunti è ripiegato non facendo quindi più presa nel calcestruzzo o se è danneggiato, lo stesso deve essere riparato o si rende necessaria l'introduzione dall'interno di una seconda impermeabilizzazione nel giunto.

Una riparazione del nastro per giunti è possibile soltanto se si può diminuire la pressione d'acqua

e mettere allo scoperto il medesimo. La riparazione del nastro avviene tramite saldatura (termoplasto) o incollatura (elastomero). Il calcestruzzo viene ripristinato con malta di cemento o malta combinata con resina epossodica.

Se non è più possibile scoprire la zona dove è situato il nastro per giunti o se lo stesso è rovinato a causa della sovrassollecitazione, la soluzione più semplice è di regola l'installazione di un secondo nastro isolante per giunti nelle fessure. A seconda dello stato delle sollecitazioni generate dal carico d'acqua e dalla dilatazione dei giunti sono applicati dei sistemi simili a quelli illustrati nella figura 4.42.

Per la riparazione del nastro per giunti, rispettivamente per l'installazione della seconda impermeabilizzazione, le perdite d'acqua nei giunti devono essere provvisoriamente ermetizzate e scaricate. In determinate situazioni è indispensabile installare nelle zone dei giunti un sistema di ritenuta d'acqua nelle parti esterne dell'opera medesima.

In singoli casi è necessario ricorrere a rivestimenti in superficie, ad es. alla malta liquida d'impermeabilizzazione a base di cemento o, in tempi più recenti, ad un prodotto che si cristallizza nei pori a base di cemento. Le particolarità ed i limiti di questi procedimenti di rivestimento devono essere tenuti in debito conto.

Questi esempi di riparazione dimostrano la problematica di un'impermeabilizzazione a posteriori. Per le nuove costruzioni deve essere prestata molta attenzione alla **necessità di futuri risanamenti** nella fase di progettazione e che devono di conseguenza essere **sviluppati ed introdotti concetti appropriati**.

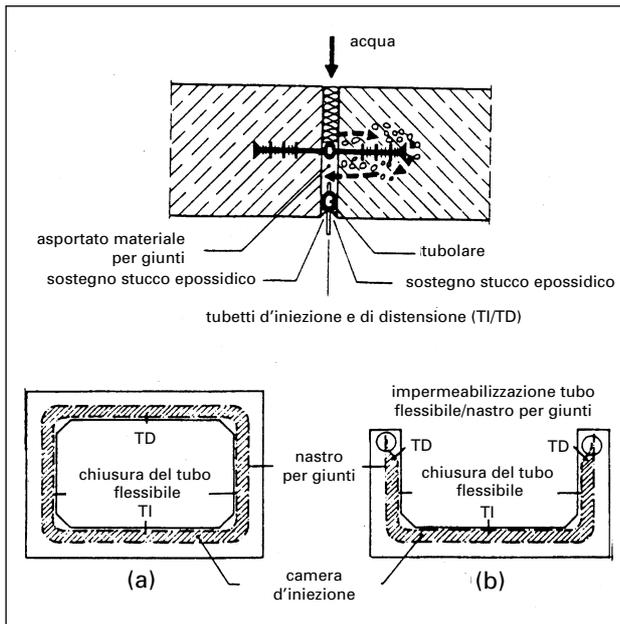


Figura 4.41 Impermeabilizzazione successiva con iniezione di un giunto di dilatazione con un nastro interno [4.49].

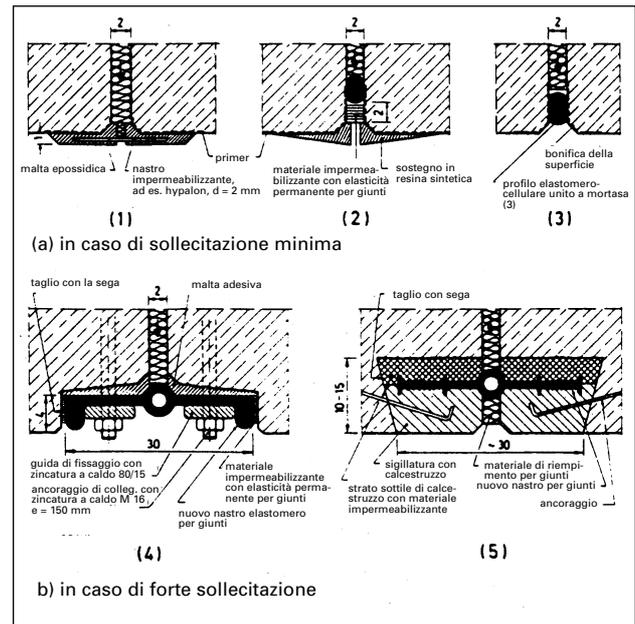


Figura 4.42 Possibilità di impermeabilizzazioni successive di giunti di dilatazione in caso di danneggiamento del nastro per giunti anegato nel calcestruzzo (schematicamente) [4.49]

- (1) nastro per giunti incollato
- (2) impermeabilizzazione con una massa ad elasticità permanente di supporto per giunti
- (3) profilo elastomero-cellulare presellato
- (4) nastro per giunti elastomero incuneato
- (5) nastro per giunti posato nella sigillatura in calcestruzzo.

Accanto ai procedimenti già citati sull'impermeabilizzazione in piano successiva di teli d'impermeabilizzazione, di seguito sono indicate diverse possibilità d'iniezione in potenziali punti deboli quali i giunti di lavoro e di dilatazione, tenendo comunque presente che le stesse possono essere applicate soltanto nel caso di nuove costruzioni.

1. Canali d'iniezione in profili di gomma spugnosa [4.49]:  
nella costruzione in calcestruzzo i profili in gomma spugnosa vengono inseriti nei punti deboli quasi sempre con una sezione squadrata (ad es.

20/10 mm) in materiale a struttura cellulare chiusa dotati di tubetti d'iniezione posti ad una distanza di 3-5 m.

Dopo l'indurimento del calcestruzzo viene iniettato il materiale d'iniezione attraverso i tubetti. La pressione d'iniezione provoca una compressione del profilo in gomma spugnosa. Contemporaneamente si forma un canale attraverso il quale il materiale d'iniezione può raggiungere tutte le fessure, le cavità in ghiaia ed i spazi vuoti collegati con lo stesso. Un esempio di applicazione in merito a questo sistema riferito ad un nastro per giunti è illustrato nella figura 4.43.

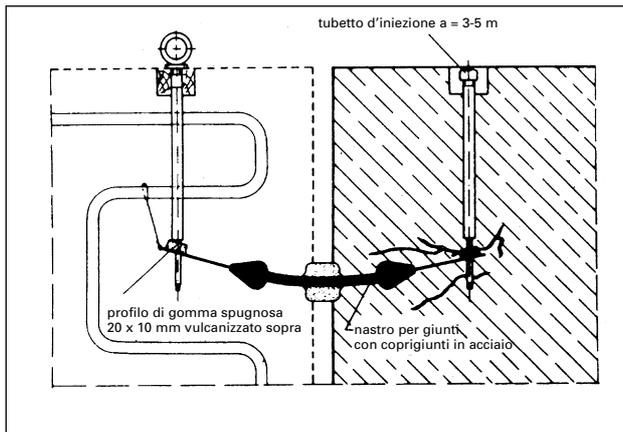


Figura 4.43 Esempio di un nastro per giunti con coprigiunti in acciaio e canaletti d'iniezione in gomma spugnosa [4.49].

## 2. Tubi flessibili d'iniezione [4.49]:

come illustra la figura 4.44a i tubi flessibili d'iniezione sono composti da:

- una spirale d'appoggio che assorbe la pressione idrostatica del calcestruzzo fresco e impedisce lo schiacciamento del tubo flessibile
- un involucro interno in tessuto di fili intrecciati in materiale sintetico che sostiene la membrana sovrastante
- una membrana velata impregnata con resina artificiale per impedire la penetrazione di particelle di calcestruzzo fresco nel tubo flessibile e la rottura al momento dell'iniezione
- un involucro esterno in tessuto resistente composto di fili sintetici come protezione della struttura interna. Attraverso la struttura di questo involucro vengono create delle piccole cavità che permettono al materiale d'iniezione di raggiungere i punti danneggiati del calcestruzzo.

Sul mercato vengono offerti anche molti altri sistemi di tubi flessibili d'iniezione. Nella scelta deve essere prestata attenzione al fatto che questi tubi devono permettere la fuoriuscita della resina d'iniezione sull'insieme della superficie e non soltanto in alcuni punti. La struttura deve inoltre impedire la penetrazione delle particelle di calcestruzzo fresco o la compressione del canale d'iniezione a seguito della pressione del calcestruzzo. I tubi flessibili d'iniezione vengono fabbricati, a seconda della situazione costruttiva, per lunghezze

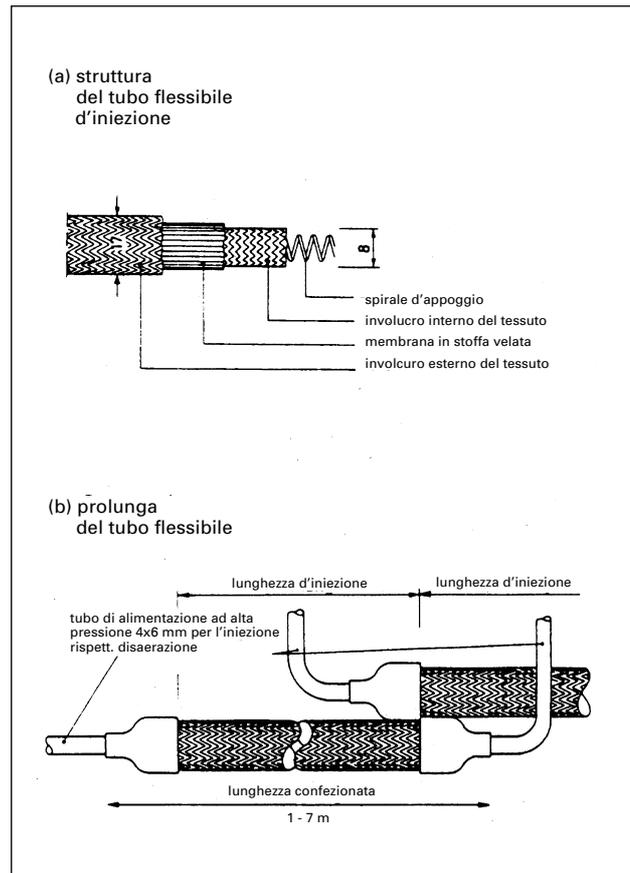


Figura 4.44 Tubo flessibile d'iniezione [4.49].

da 1 a 7 m. Alle due estremità sono applicati dei tubi di alimentazione ad alta pressione per il riempimento e la disaerazione. In posizioni ben accessibili gli stessi vengono portati fuori dal calcestruzzo. L'accoppiamento del tubo flessibile avviene tramite contatto diretto, ad es. come illustra la figura 4.44b oppure con una connessione molto stretta (5 a 10 cm).

## 3. Tubi con guarnizioni anulari [4.49]:

un sistema d'iniezione sviluppato in special modo per giunti a targonata, ma utilizzabile anche per altre procedure, è rappresentato dal tubo con guarnizione anulare illustrato nella figura 4.45. Si tratta di tubi sintetici non flessibili (diametro esterno 33 mm, diametro interno 25 mm) con valvole ad iniezione speciali collocate ad una distanza di 30 cm dalle quali può fuoriuscire il materiale d'iniezione.

Contrariamente ai normali tubi con guarnizioni anulari solitamente utilizzati per iniezioni nel terreno di fondazione, i tubi maggiormente sviluppati dispongono di valvole ad iniezione funzionanti anche nel caso in cui sono annegate nel calcestruzzo. Ciò è reso possibile da guarnizioni anulari supplementari esterne in materiale elasto-plastico.

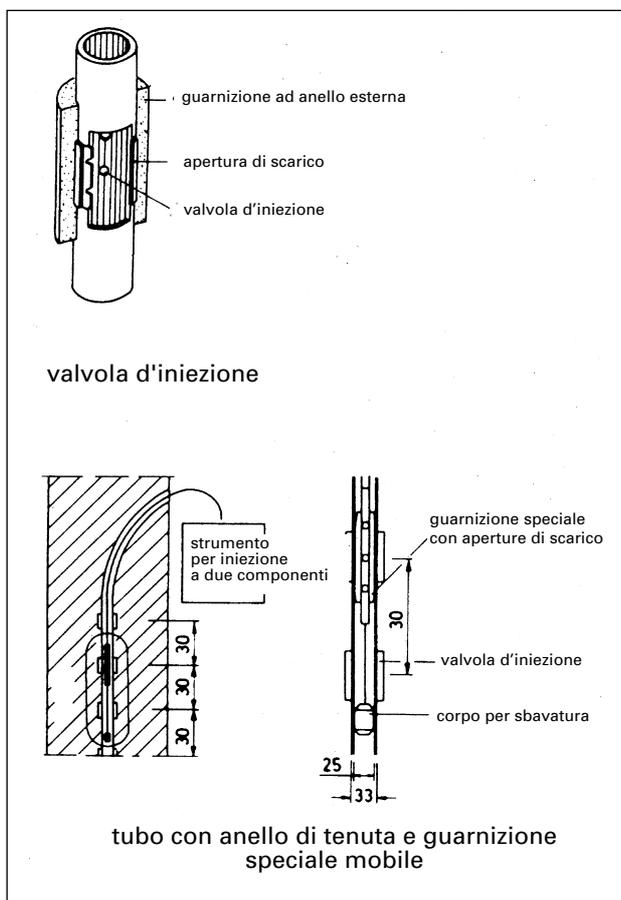


Figura 4.45 Tubo con guarnizione anulare [4.49].

L'iniezione avviene attraverso un tubo flessibile ad alta pressione introdotto nel tubo con anello di tenuta per mezzo di una guarnizione mobile speciale. In questo modo le valvole d'iniezione sono singolarmente raggiunte una dopo l'altra ed iniettate. I tubi d'iniezione medesimi rimangono liberi dal materiale d'iniezione. In questo modo è possibile sia un'iniezione per settori sia un'iniezione successiva.

I vantaggi principali di questo sistema sono:

- i punti difettosi locali e le perdite possono essere impermeabilizzati in diverse tappe e gradualmente con limitate quantità d'iniezione.
- La pressione d'iniezione agisce sulle superfici di fessurazione, rispettivamente dei giunti attraverso una sola valvola d'iniezione. Anche in caso di pressione d'iniezione elevata un allargamento delle fessure o dei giunti è praticamente impossibile.

#### 4. Profilato elastomero per giunti con capacità di rigonfiamento [4.49]:

in Giappone lo stesso è utilizzato per l'impermeabilizzazione di giunti-Tübbing (figura 4.46). Il materiale è in gomma artificiale in cloroprene combinato con resina che si gonfia con la penetrazione d'acqua.

Con l'assorbimento dell'acqua il volume del nastro aumenta fino a 10 volte impermeabilizzando il giunto attraverso una pressione di contatto sui fianchi del medesimo. Analisi eseguite dalla STUVA hanno dimostrato che questo nastro impermeabilizza in modo soddisfacente soltanto nel caso in cui lo stesso sia permanentemente in acqua. In caso di limitata modifica del volume dovuto alle caratteristiche dei giunti, il comportamento di rigonfiamento produce un effetto impermeabilizzante, fino a pressioni di 10 bar in condizioni di laboratorio.

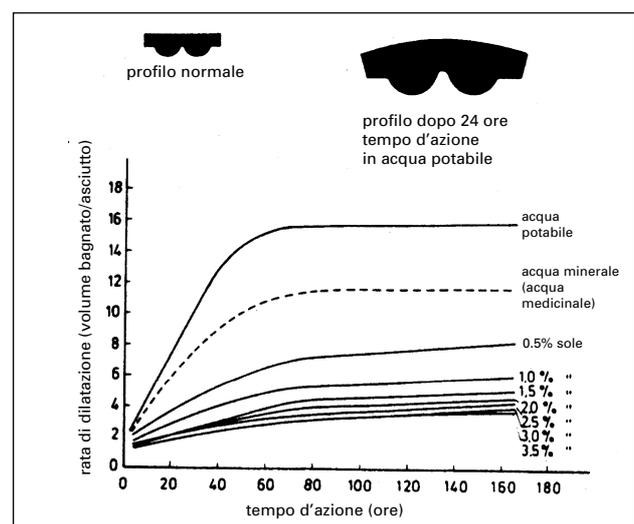


Figura 4.46 Rate di dilatazione dei nastri rigonfiati per giunti in soluzioni acquose a dipendenza del tempo d'azione [4.49].

#### 4.5.5 Sostituzione

La sostituzione di sistemi d'impermeabilizzazione è possibile ed usuale in **solette di ponti stradali ed in costruzioni con funzioni simili come ad es. le coperture dei parcheggi**. In base ad un esame della situazione si decide se sia necessaria soltanto una sostituzione parziale (ad es. sostituzione delle chiusure dei bordi) od una sostituzione totale.

È pure importante tener conto del fatto che spesso le impermeabilizzazioni vengono danneggiate al momento della sostituzione del rivestimento e che di conseguenza le stesse dovranno essere rimpiazzate.

Una sostituzione parziale può di regola dare un risultato soddisfacente soltanto se l'impermeabilizzazione esistente è incollata su tutta la superficie o per lo meno parzialmente. In caso di impermeabilizzazioni flottanti un risanamento parziale, il più delle volte, non dà i risultati attesi perchè l'acqua infiltrata può essersi diffusa su una vasta superficie e perchè il sale antigelo ivi contenuto può già aver creato dei danni al calcestruzzo della struttura portante.

La progettazione della sostituzione di un sistema d'impermeabilizzazione è un compito molto arduo perchè normalmente questi lavori devono essere eseguiti «con strade aperte al traffico». Il punto [1.1] contiene delle indicazioni a questo riguardo. Anche dal punto di vista tecnologico devono essere tenuti in considerazione molti aspetti. Accanto alle esigenze normative si trovano delle indicazioni nei punti [4.46] e [4.53].

A causa dei danni provocati dalla corrosione sulle armature delle solette in cemento armato carrozzabili nelle autorimesse e nei parcheggi a più piani, da diverso tempo è manifesta la chiara tendenza ad impermeabilizzare queste zone. Ciò è tanto più necessario per impianti soggetti ad un tasso elevato di ricambio di veicoli e quindi ad una maggiore immissione di cloruri. Indicazioni per la progettazione e l'esecuzione di queste impermeabilizzazioni si trovano, tra l'altro, nei punti [4.61].

La sostituzione di sistemi d'impermeabilizzazione è possibile nelle **strutture portanti inghiaiate** come ad esempio **nei tetti di autorimesse, nelle gallerie e tunnel a giorno**, ma sovente questo procedimento è molto costoso. Se non è possibile impedire la penetrazione di acqua dal lato accessibile interno, questo provvedimento rappresenta comunque l'unica soluzione.

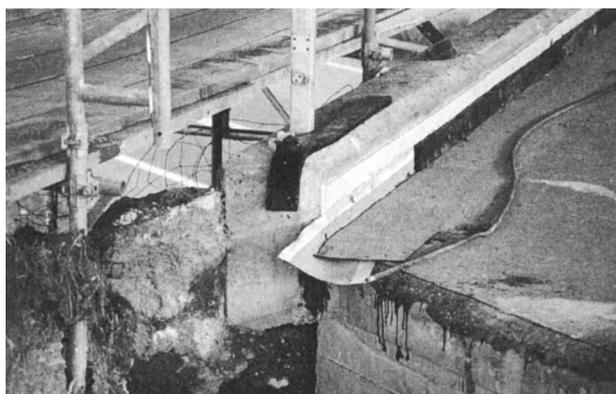


Figura 4.47 Esecuzione di una nuova chiusura del bordo nel risanamento di un ponte (impermeabilizzazione TIPB).

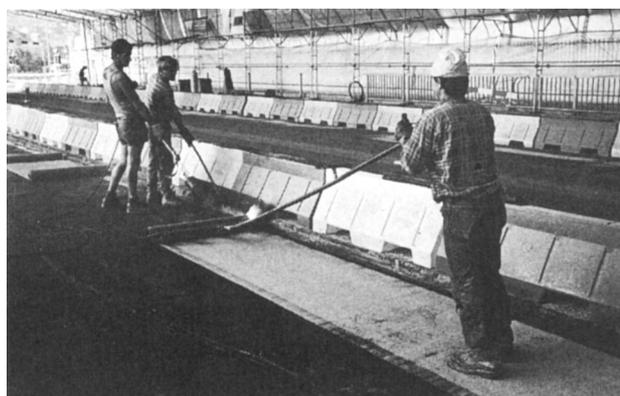


Figura 4.48 Esecuzione di una nuova impermeabilizzazione di un ponte (TIPB).

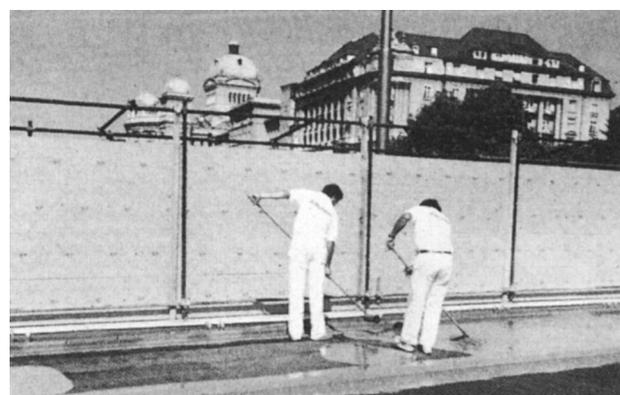


Figura 4.49 Esecuzione di una nuova impermeabilizzazione di un ponte con materiale sintetico liquido (MSL).

## **5. Costruzioni in acciaio**

---

<b>5.1</b>	<b>In generale</b>	<b>102</b>
<b>5.2</b>	<b>Meccanismi di invecchiamento e danneggiamento</b>	<b>105</b>
<b>5.3</b>	<b>Tipi di protezione contro la corrosione</b>	<b>109</b>
<b>5.4</b>	<b>Controllo e manutenzione</b>	<b>114</b>
<b>5.5</b>	<b>Rinnovamento</b>	<b>114</b>

---

## 5. Costruzioni in acciaio

### 5.1 In generale

Le costruzioni in acciaio sono conosciute da tempo sia nel settore delle opere di infrastruttura che del genio civile. È stato costruito negli anni 1777-1779 in questo modo il più vecchio ponte ad arco in ghisa sul Severn presso Coalbrookdale, in Inghilterra, ancora oggi in servizio (figura 5.1), [5.1]. Anche nel nostro paese sono stati di seguito utilizzate le più svariate qualità di ferro ed acciaio tra l'altro anche per la costruzione di ponti (figura 5.2), serbatoi e costruzioni a shed:

- ghisa
- ferro saldato (fino ca. negli anni 1890/92) denominato anche ferro puddellato (attenzione: nonostante la denominazione «ferro saldato» lo stesso non è saldabile)
- acciaio dolce «vecchio», acciaio Thomas
- acciai elettrici (Siemens/Martin, ecc.)
- acciaio dolce «nuovo», acciai «calmati» (acciai 37.1, 37.2, 37.3)
- acciaio fuso
- acciai a grana fine odierni (saldabilità ottimale)
- acciai speciali:
  - i cosiddetti acciai di costruzione «resistenti agli agenti atmosferici» (tipo «Corten», «Patinax» e simili)
  - acciai inossidabili [5.2]

Sin dall'inizio dell'utilizzo del ferro e dell'acciaio si è potuto constatare che questi materiali sono soggetti a corrosione in assenza di sistemi protettivi [5.3]. I tipi ricchi di carbonio, come il ferro saldato e la ghisa grigia, sono meno soggetti alla corrosione.

La necessità di prevedere rivestimenti di protezione contro la corrosione è iniziata soprattutto con l'era della costruzione di ferrovie. I ponti costruiti in quel periodo, sia in acciaio fuso che in acciaio saldato chiodati, dovevano essere protetti contro la corrosione. Già nel 1790 venne quindi costruita in Inghilterra la prima fabbrica di vernice. La modalità di rivestimento più interessante adottata per molto tempo è stata quella con uno o due fondi di minio in olio di lino, con l'aggiunta di due e più mani di una copertura di finitura di grafite in olio di lino. Un'ulteriore pietra miliare nella storia della protezione contro la corrosione è rappresentata dal primo rivestimento organico in polvere di zinco realizzato dagli inglesi nel 1940. Siccome un'aderenza ottimale di questo rivestimento è possibile solo su una superficie granulata in acciaio pulita meccanicamente con sabbiatura, la Royal Navy emanò una direttiva che indicava la sabbiatura quale rimedio universale di preparazione della superficie [5.4].



Figura 5.1 Ponte ad arco in ghisa sul Severn presso Coalbrookdale - luce 30 m [5.1]



Figura 5.2 Ponte Kirchfeld a Berna, risanato e parzialmente rinnovato di recente.

Anche in Svizzera l'olio di lino, mischiato nella mano di finitura in mica di fondo e di ferro con pigmenti di minio, fu per lungo tempo il legante utilizzato. Si tratta di una soluzione semplice che può essere eseguita da ogni pittore. Con la comparsa di nuovi materiali di rivestimento sul mercato, la protezione della superficie in acciaio è diventata più difficile. Ciò concerneva soprattutto il trattamento preliminare del sottofondo e le condizioni d'indurimento nei fondi con polvere di zinco.

Nella costruzione in acciaio la necessità dei provvedimenti di mantenimento, soprattutto nell'ambito della protezione contro la corrosione, è stata tempestivamente riconosciuta. Per tutte le costruzioni in acciaio esposte agli influssi atmosferici ed altri influssi dannosi, la manutenzione è molto importante. Nelle costruzioni monumentali come ad esempio la Torre d'Eifel o il Ponte Golden Gate a San Francisco un gruppo di specialisti è permanentemente occupato con questo lavoro. In quest'ultima costruzione la protezione contro la corrosione è sottoposta a manutenzione permanente già a partire dagli anni 40 (figura 5.3). Nel 1968 si decise di sostituire il rivestimento originale in mica con un rivestimento inorganico in polvere di zinco.

È stato accertato che il gruppo di specialisti composto da 39 uomini impiegherà ca. 25 anni di lavoro, sino alla completa sostituzione del vecchio rivestimento [5.5].

Mentre la necessità di manutenzione per le costruzioni in cemento armato è stata riconosciuta soltanto recentemente, quella della costruzione in acciaio è ormai tradizione. Ma anche in questo campo è manifesto un mutamento tecnologico, non da ultimo a seguito di nuove disposizioni di legge relative alla tollerabilità ambientale dei materiali utilizzati.

La prima raccomandazione della Centrale svizzera per le costruzioni in acciaio (CSA) su questa problematica è stata pubblicata nel 1969 e comprendeva solo 4 pagine di testo. Una nuova rielaborazione denominata B3 con un totale di 31 pagine, è stata pubblicata dalla Centrale nel 1982. Appena 8 anni più tardi è stata presentata la nuova **B3** come **norma SN No. 555 001** [5.6]. Il testo con allegati e con l'indice delle abbreviazioni è composto di 53 pagine (figura 5.4).

Questa norma corrisponde alle conoscenze tecniche attuali.

La stessa tiene inoltre conto degli sviluppi della tecnica di protezione contro la corrosione dell'ultimo decennio come pure dell'aumento dell'offerta di prodotti (ad es. poliuretani indurenti a umi-

dità con una sola componente di base che possono essere applicati anche in condizioni atmosferiche molto sfavorevoli). Nel testo sono pure trattate le esigenze di protezione ambientale e di igiene del lavoro.

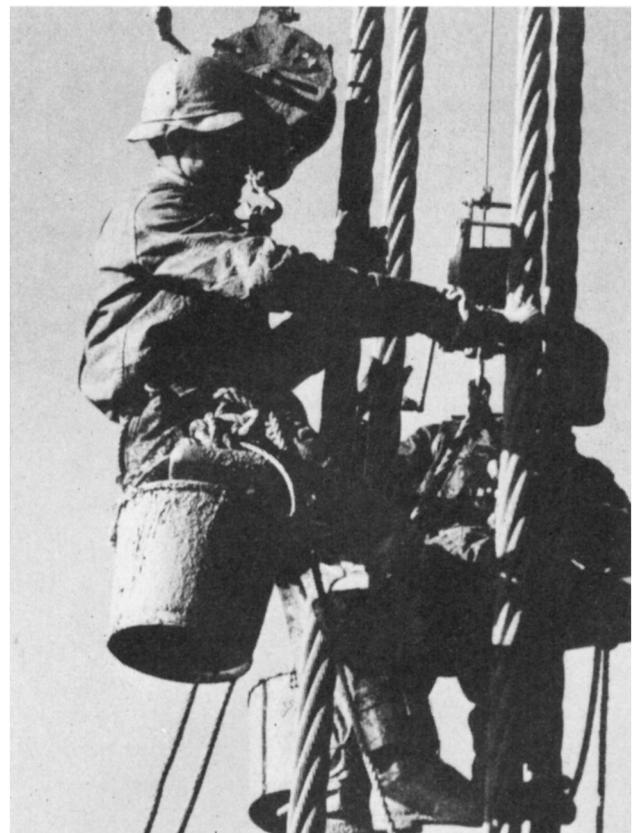


Figura 5.3 Ponte Golden Gate - operai che si occupano del rivestimento delle funi di sospensione [5.5].

Schweizer Norm Norme suisses Norma Svizzera		<b>NS</b>																																																													
Edilizio		556 001																																																													
INCE TRAGEME NORMA DER SCHWEIZERISCHEN NORMEN VEREINIGUNG SAV NORME ENREGISTREES DE L'ASSOCIATION SUISSE DE NORMALISATION																																																															
<b>B3</b>		<b>Protezione per la superficie di costruzioni in acciaio</b>																																																													
																																																															
<b>Protezione contro la corrosione con rivestimenti e coperture pubblicato dalla TK SZS</b>																																																															
<b>Indice</b>																																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>1.</th> <th>Introduzione</th> <th colspan="2">pagina</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.1</td> <td>Campo di validità</td> <td>5</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1.2</td> <td>Informazione</td> <td>6</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				1.	Introduzione	pagina		1.1	Campo di validità	5		1.2	Informazione	6																																																	
1.	Introduzione	pagina																																																													
1.1	Campo di validità	5																																																													
1.2	Informazione	6																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>2.</th> <th>Progettazione</th> <th colspan="2">pagina</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2.1</td> <td>Influssi atmosferici e carichi</td> <td>11</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2.2</td> <td>Misure costruttive</td> <td>12</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2.3</td> <td>Programma costruttivo</td> <td>13</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2.4</td> <td>Rivestimenti e coperture usuali</td> <td>14</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2.5</td> <td>Compatibilità</td> <td>16</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2.6</td> <td>Caratteristiche chimico-fisiche dei rivestimenti e coperture</td> <td>18</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2.7</td> <td>Funzione e aspetto della superficie</td> <td>20</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2.8</td> <td>Costi e manutenzione della protezione della superficie</td> <td>21</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		2.	Progettazione	pagina		2.1	Influssi atmosferici e carichi	11		2.2	Misure costruttive	12		2.3	Programma costruttivo	13		2.4	Rivestimenti e coperture usuali	14		2.5	Compatibilità	16		2.6	Caratteristiche chimico-fisiche dei rivestimenti e coperture	18		2.7	Funzione e aspetto della superficie	20		2.8	Costi e manutenzione della protezione della superficie	21		<table border="1"> <thead> <tr> <th>3.</th> <th>Esecuzione e controllo</th> <th colspan="2">pagina</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3.1</td> <td>Preparazione della superficie in metallo</td> <td>23</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3.2</td> <td>Qualità dei materiali di rivestimento e coperture</td> <td>25</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3.3</td> <td>Applicazione di rivestimenti e coperture</td> <td>25</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3.4</td> <td>Spessore dello strato, aderenza, porosità</td> <td>28</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3.5</td> <td>Riparazioni</td> <td>31</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		3.	Esecuzione e controllo	pagina		3.1	Preparazione della superficie in metallo	23		3.2	Qualità dei materiali di rivestimento e coperture	25		3.3	Applicazione di rivestimenti e coperture	25		3.4	Spessore dello strato, aderenza, porosità	28		3.5	Riparazioni	31	
2.	Progettazione	pagina																																																													
2.1	Influssi atmosferici e carichi	11																																																													
2.2	Misure costruttive	12																																																													
2.3	Programma costruttivo	13																																																													
2.4	Rivestimenti e coperture usuali	14																																																													
2.5	Compatibilità	16																																																													
2.6	Caratteristiche chimico-fisiche dei rivestimenti e coperture	18																																																													
2.7	Funzione e aspetto della superficie	20																																																													
2.8	Costi e manutenzione della protezione della superficie	21																																																													
3.	Esecuzione e controllo	pagina																																																													
3.1	Preparazione della superficie in metallo	23																																																													
3.2	Qualità dei materiali di rivestimento e coperture	25																																																													
3.3	Applicazione di rivestimenti e coperture	25																																																													
3.4	Spessore dello strato, aderenza, porosità	28																																																													
3.5	Riparazioni	31																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>4.</th> <th>Rendimento e fornitura</th> <th colspan="2">pagina</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.1</td> <td>Raccomandazioni per le condizioni contrattuali e per le forniture</td> <td>33</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4.2</td> <td>Termini per i collaudi e per reclami</td> <td>35</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		4.	Rendimento e fornitura	pagina		4.1	Raccomandazioni per le condizioni contrattuali e per le forniture	33		4.2	Termini per i collaudi e per reclami	35		<table border="1"> <thead> <tr> <th>5.</th> <th>Rinnovamenti</th> <th colspan="2">pagina</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5.1</td> <td>Verifica della condizione</td> <td>38</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5.2</td> <td>Criteri decisionali</td> <td>39</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5.3</td> <td>Esecuzione</td> <td>40</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5.4</td> <td>Problemi speciali</td> <td>40</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5.5</td> <td>Rinnovamento di coperture metalli che e sistemi-duplex</td> <td>41</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		5.	Rinnovamenti	pagina		5.1	Verifica della condizione	38		5.2	Criteri decisionali	39		5.3	Esecuzione	40		5.4	Problemi speciali	40		5.5	Rinnovamento di coperture metalli che e sistemi-duplex	41																									
4.	Rendimento e fornitura	pagina																																																													
4.1	Raccomandazioni per le condizioni contrattuali e per le forniture	33																																																													
4.2	Termini per i collaudi e per reclami	35																																																													
5.	Rinnovamenti	pagina																																																													
5.1	Verifica della condizione	38																																																													
5.2	Criteri decisionali	39																																																													
5.3	Esecuzione	40																																																													
5.4	Problemi speciali	40																																																													
5.5	Rinnovamento di coperture metalli che e sistemi-duplex	41																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>6</th> <th>Allegato</th> <th colspan="2">pagina</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>6.1</td> <td>Norme e direttive</td> <td>43</td> <td></td> </tr> <tr> <td>6.2</td> <td>Elenco analitico</td> <td>48</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				6	Allegato	pagina		6.1	Norme e direttive	43		6.2	Elenco analitico	48																																																	
6	Allegato	pagina																																																													
6.1	Norme e direttive	43																																																													
6.2	Elenco analitico	48																																																													
<b>1990</b> Centrale Svizzera per la costruzione in acciaio Seefeldstrasse 25, 8034 Zurigo 01 / 26 89 90																																																															

Figura 5.4 Titolo e contenuto della nuova norma Svizzera NS 555 001, B3.

Nel campo di applicazione di questa norma, considerata come strumento di lavoro dell'ingegnere progettista ed esecutore, si può leggere quanto segue:

«La presente norma va interpretata come introduzione alla tematica complessiva della protezione di superficie di costruzioni in acciaio e quale guida per un adeguato procedimento.

Una protezione adeguata della superficie può essere decisa dagli interessati alla costruzione in base a questa norma tenendo comunque conto del fatto che le esigenze, la durata della protezione e, se del caso, la durata della funzione estetica devono corrispondere al piano d'utilizzazione secondo la norma SIA 160. La presente norma è inoltre utile a progettisti ed impresari come base per l'elaborazione del contratto.

La stessa serve come garanzia funzionale di qualità della protezione delle superficie. I provvedimenti inerenti alla garanzia di qualità sono trattati nei singoli capitoli.

I trattamenti di protezione delle superfici poco utilizzati, come ad es. procedimenti continui per la produzione di coperture metalliche, procedimenti elettrolitici, rivestimenti con polveri, amalgame, rivestimenti termici a spruzzo e sistemi con strati a forte spessore, sono ignorati o trattati solo marginalmente».

Tenuto conto che la B3 tratta anche la tematica del rinnovamento della protezione delle superfici, la presente documentazione può limitarsi a segnalare, nei seguenti capitoli, alcune informazioni supplementari. Se nel caso singolo sono state citate parti della norma, ciò è soltanto per garantire la comprensibilità del testo.

È importante osservare come la B3 utilizza dei termini generali che in parte divergono da quelli della raccomandazione SIA 169 (1987). Le differenze sono illustrate nella figura 5.5.

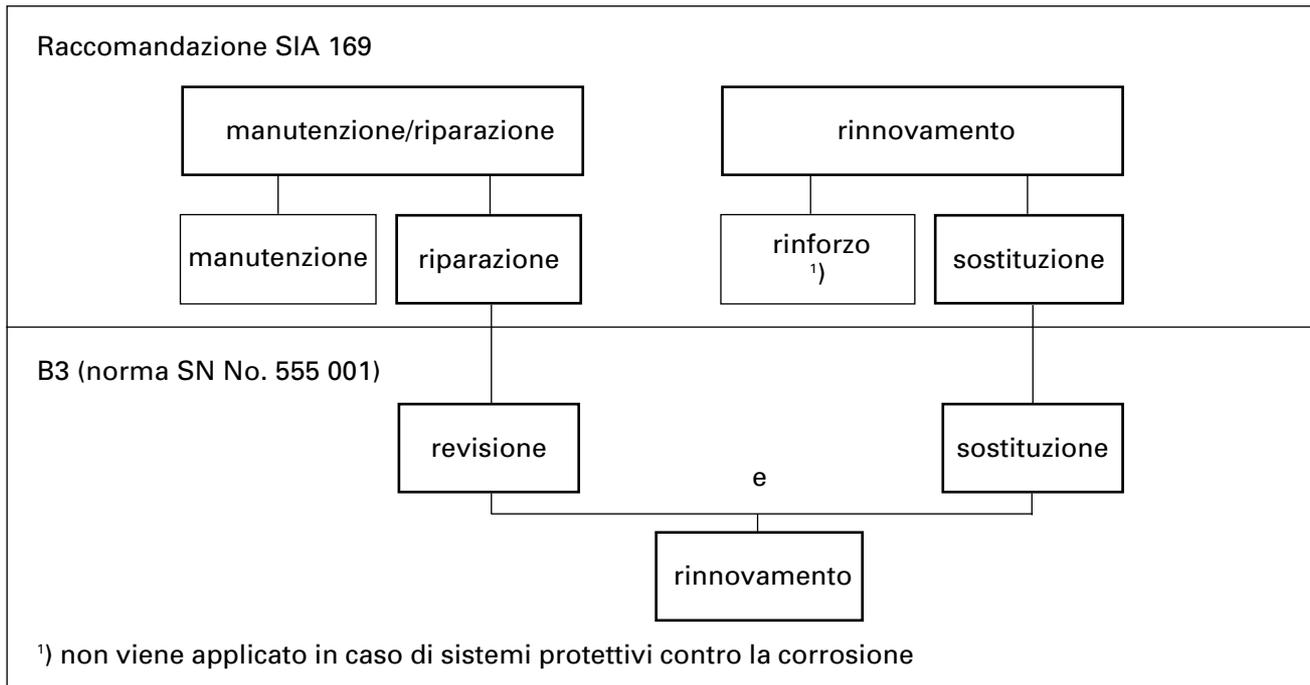


Figura 5.5 Differenze nei termini generali tra la raccomandazione SIA 169 (1987) e la B3 (1990) applicabili per la protezione contro la corrosione.

## 5.2 Meccanismi di invecchiamento e danneggiamento

Le indicazioni di principio relative ai meccanismi di invecchiamento e danneggiamento valide per tutti i materiali da costruzione, sono contenute nel cap. 2.3.

Per la corrosione dell'acciaio è necessario la presenza di acqua e di un mezzo di ossidazione. Nei mezzi corrosivi sia neutrali che alcalini, l'ossigeno agisce come mezzo di ossidazione (figura 5.6).

In assenza di ossigeno e/o acqua la corrosione non avviene. Per contro, l'acciaio può essere corroso al contatto con mezzi corrosivi acidi anche in assenza di ossigeno atmosferico.

Come illustra la figura 5.7 la corrosione dell'acciaio inizia quando l'umidità relativa dell'aria è attorno al 60% e, se si è in presenza di cloruri, già con valori inferiori.

Una superficie in acciaio costantemente asciutta non viene praticamente mai corrosa. Più tempo una superficie è esposta all'umidità e maggiori sono le componenti aggressive nel film di condensa, più rapidamente corrode l'acciaio. Sali con proprietà igroscopiche o sostanze sospese nell'aria favoriscono la condensazione ed aumentano la formazione di questo film. Anche i ponti termici presentano questo effetto. Esempi tipici di sostanze nocive sono l'acido solforico rispettivamente il solfato derivante da gas combustivi come anche il cloruro derivante da sali antigelo.

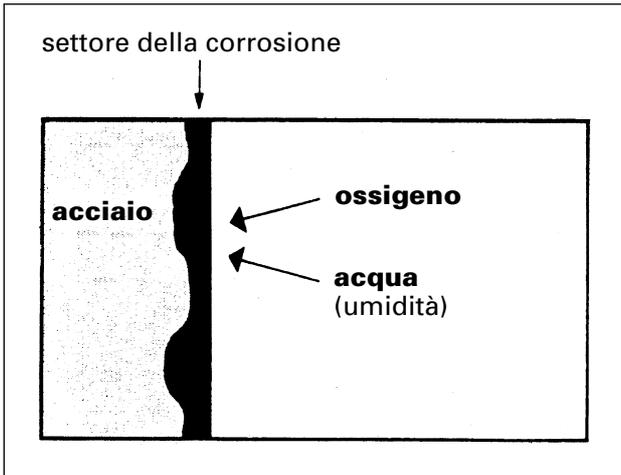


Figura 5.6 Corrosione causata dall'acqua e dall'ossigeno [5.6].

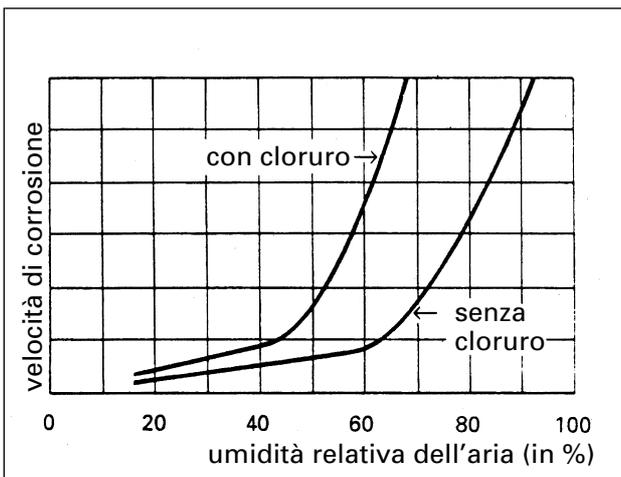


Figura 5.7 Velocità di corrosione dell'acciaio in funzione dell'umidità relativa dell'aria e della presenza di cloruri [5.6].

Nei metalli attivi come acciaio ed acciaio zincato, la corrosione ha luogo su tutta la superficie in acciaio esposta. L'asportazione procede più o meno in piano.

I metalli passivi come ad es. l'acciaio al cromo-nichel e l'alluminio sono protetti di solito contro la corrosione tramite uno strato passivante. La corrosione può avere luogo soltanto se questo strato è danneggiato in qualche punto, ad es. a causa del cloruro. La corrosione avviene di regola soltanto in poche zone della superficie in metallo e può portare inavvertitamente al cedimento di un elemento portante. Per l'impiego di acciai inossidabili vedi [5.2]. Il comportamento differenziato è illustrato nella figura 5.8.

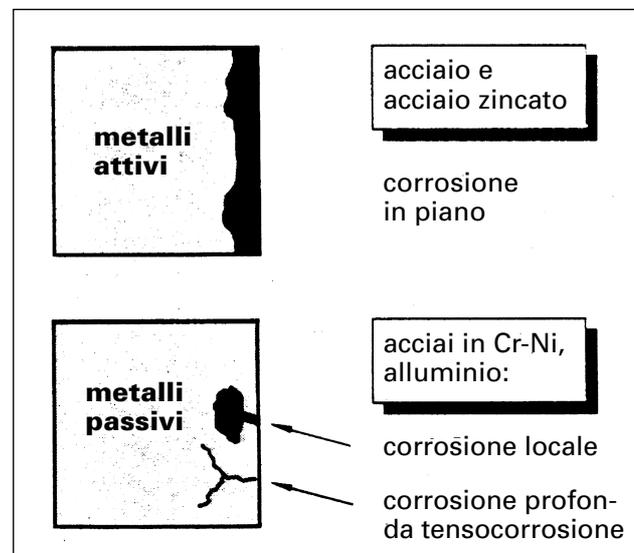


Figura 5.8 Comportamenti differenziati della corrosione di metalli attivi e passivi [5.6].

Gli influssi ambientali sono suddivisibile in due categorie e cioè **macroclima e microclima**. Quale **macroclima** viene definito il tipo di atmosfera esistente sul luogo della costruzione. In questo ambito vengono distinti i due tipi principali; atmosfera normale ed atmosfera aggressiva. La classe di corrosività di un macroclima è stabilita in base a tassi d'asportazione annui di eliche metalliche esposte agli agenti atmosferici naturali secondo DIN 50917. Per il ferro e lo zinco valgono i valori della tabella 5.1.

Classe di corrosività	1	2	3	4	5
tasso d'asportazione ferro	≤ 20	≤ 40	≤ 60	≤ 80	> 80
in μm/anno zinco	≤ 1,25	≤ 2,25	≤ 3,25	≤ 4,25	> 4,25

Figura 5.1 Definizione delle classi di corrosività del macroclima.  
 I valori misurati in sette zone rurali ed urbane in Svizzera (da Sion fino Basilea) dimostrano un tasso d'asportazione di 18...37 μm per il ferro e di 1.15...2.65 μm per lo zinco (stato 1989).

La tabella 5.2 serve per la comprensione della definizione di macroclima

Tipo principale	Classe di corrosività	Descrizione	Tipo di atmosfera conosciuta attualmente
atmosfera normale	1 e 2	Carico corrosivo minimo: l'atmosfera è priva di contenuti di anidride solforosa importanti come pure di altre sostanze nocive: ad es. zone rurali e piccole città.	campagna
	2 e 3	Carico corrosivo medio: l'atmosfera ha un contenuto medio di anidride solforosa come pure di altre sostanze nocive: ad es. zone densamente abitate senza concentrazione elevata di industrie.	città
atmosfera aggressiva	3 fino a 5	Carico corrosivo forte: l'atmosfera presenta un alto contenuto di anidride solforosa come pure di altre sostanze nocive: ad es. zone con forte concentrazione di industrie ed aree soggette a correnti ventose in provenienza da questi siti.	industria
	4 e 5	Carico corrosivo molto forte: l'atmosfera è inquinata con sostanze nocive particolarmente corrosive (ad es. cloruri) e/o con un'alta umidità dell'aria: ad es. al di sopra della superficie del mare ed in vicinanza di zone costiere.	mare

Figura 5.2 Attribuzione del macroclima e del tipo di atmosfera.

I tassi d'asportazione per il ferro e lo zinco nella tabella 5.1 sono stati ripresi dalla norma DIN 50917. In Svizzera, a partire dal 1985, i tassi d'asportazione di cinque metalli sono registrati sistematicamente in 7 punti di rilevamento della rete «Nabel» (**Rete Nazionale** di rilevamento delle **Sostanze** nocive nell'atmosfera). In questo modo si denotano già chiaramente delle differenze regionali. I tassi d'asportazione nelle zone di Basilea, Lugano e Zurigo sono ad es. maggiori di quelli in zone rurali di Payerne e Tänikon. I valori più bassi sono registrati a Sion; il motivo è da ricercare nell'effetto di essiccazione dovuto al vento nella Valle del Rodano. Secondo lo stato conosciuto fino al 1989, **i valori d'asportazione annuali variano per il ferro da 18 a 37 µm e per lo zinco da 1,15 a 2,65 µm.** Gli stessi corrispondono quindi alle classi di corrosione 1 e 2/3 secondo DIN ovvero **i carichi di corrosione sono minimi o medi.**

In base a questi valori misurati l'ingegnere progettista ha a disposizione, per la prima volta, dei dati regionali che permettono un calcolo della durata di vita rispettivamente della durata d'utilizzo. Con condizioni esterne costanti ed in assenza di maggiori influssi aggressivi locali, la durata, fino alla completa asportazione di uno strato di protezione zincato ad es. 100 mm di spessore, è di:

$$\text{a Sion} \quad \frac{100 \mu\text{m}}{1,15 \mu\text{m}} = \text{ca. 70 anni}$$

$$\text{a Basilea} \quad \frac{100 \mu\text{m}}{2,65 \mu\text{m}} = \text{ca. 39 anni}$$

I valori calcolati non sono paragonabili con la durata di vita dello strato protettivo; il processo corrosivo inizia già prima e si rende quindi necessario un rinnovamento efficace in particolare in aree urbane, dopo ca. 2/3 del periodo di tempo indicato. Il periodo di tempo valutato di ca. 39 anni per le aree urbane sembra, per esperienza, troppo ottimistico. Da esperienze fatte a Zurigo si può dedurre che il periodo di tempo sia piuttosto di 20 - 30 anni.

Come **microclima** sono definiti gli influssi che agiscono nelle immediate vicinanze di una costruzione in acciaio o direttamente sul singolo elemento costruttivo.

Il microclima è determinato dai seguenti fattori:

- umidità relativa dell'aria, temperature dell'aria e della superficie
- esposizione agli agenti atmosferici (esposizione diretta o protetta)
- locale aumento degli influssi aggressivi.

Gli aumenti locali degli influssi aggressivi con determinati carichi corrosivi si possono osservare ad es. nelle seguenti zone:

- sull'intradosso di un ponte sopra lo specchio d'acqua
- nella zona con formazione di condensa in corrispondenza di ponti termici
- zone soggette a spruzzi d'acqua
- settore degli scarichi dell'acqua piovana in elementi costruttivi di calcestruzzo
- costruzioni soggette all'influenza della vaporizzazione di antigelo
- nelle vicinanze di un reparto di decapaggio
- zone con depositi di sostanze nocive (inquinamento dell'aria, prodotti chimici, escrementi, ecc.)
- luoghi con influssi elettrochimici (differenze di potenziale, correnti vaganti).

Al momento della progettazione degli elementi costruttivi, gli influssi del microclima corrispondente devono essere tenuti in considerazione e ciò presuppone di disporre di buone conoscenze di dettaglio.

In conclusione va segnalato che in Svizzera i costi della corrosione dell'acciaio, secondo una valutazione di esperti, ammonta annualmente a ca. cinque miliardi di franchi. La quota parte riguardante la costruzione in acciaio è minima.

### 5.3 Tipi di protezione contro la corrosione

Come illustrato nella figura 5.9 esistono le seguenti possibilità di proteggere l'acciaio dalla corrosione:

- protezione della superficie
- alligazione dell'acciaio
- modifiche degli influssi ambientali

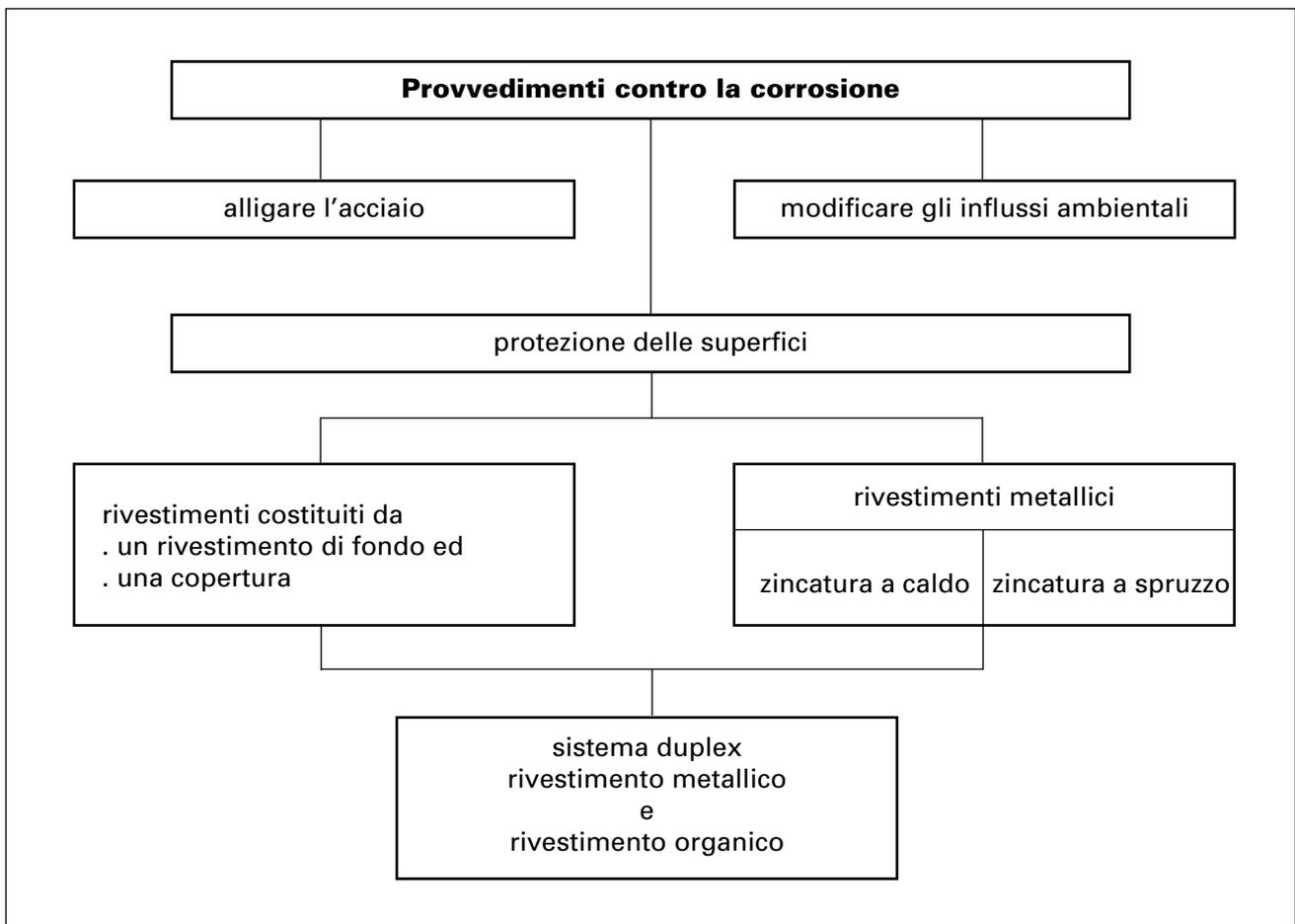


Figura 5.9 Articolazione delle misure contro la corrosione dell'acciaio.

## Protezione della superficie

Per la protezione usuale della superficie di costruzioni in acciaio fa stato la norma B3 richiamata. Di seguito è illustrata la tabella dei rivestimenti usuali e delle coperture ripresi dalla norma B3 (tabella 5.3). Nei rivestimenti si opera una distinzione tra rivestimento di fondo che serve sia da collegamento tra il sottofondo ed il soprastante strato di copertura sia come effettiva protezione contro la corrosione e lo strato di copertura che deve essere adattato agli strati sottostanti e dare al rivestimento medesimo le opportune caratteristiche quali la tonalità, il grado di lucentezza, la struttura e la resistenza agli agenti esterni.

I rivestimenti di fondo e le coperture citate nella tabella 5.3 sono caratterizzati secondo loro «codici». Gli stessi corrispondono ai seguenti prodotti:

P1	1K-rivestimento di fondo - in fosfato di zinco
P2	2K-rivestimento di fondo - in fosfato di zinco
M1	1K-rivestimento di fondo - in minio o silico cromato di piombo
M2	2K-rivestimento di fondo - in minio
Z1	1K-rivestimento di fondo - in polvere di zinco
Z2	2K-rivestimento di fondo - in polvere di zinco
ZS	1K-rivestimento di fondo - in polvere di zinco - silicato
F	copertura in zincatura a caldo
S	copertura in zincatura a spruzzo

I «codici» per i tipi di leganti sono i seguenti:

1K	(legante) ad una componente
2K	(legante) a due componenti
FH	indurente a umidità (umidità d'aria quale seconda componente)

## Annotazioni riferite alla tabella 5.3

- (2) Per motivi di protezione ambientale i rivestimenti di fondo in piombo devono essere limitati ai casi in cui la preparazione della superficie, la compatibilità e le possibilità di applicazione non permettono l'uso di prodotti alternativi. L'applicazione a spruzzo di materiali di fondo contenenti minio deve essere evitata.
- (3) Nel caso di una presumibile formazione di condensa locale è necessario uno strato di copertura nelle zone colpite.
- (4) Grado di preparazione della superficie necessario Sa 1/2.
- (5) La rugosità e la struttura della superficie in acciaio opportune sono di regola raggiungibili soltanto attraverso un getto al minerale. La rugosità della superficie trattata viene determinata secondo ISO 8503-2. A seconda della graduazione da «medio» a «rugoso» è raccomandata una rugosità maggiore del segmento 1 ma inferiore al segmento 4.
- (6) Lo spessore minimo dello strato di 60 µm è sufficiente per ZS-rivestimenti. Lo spessore massimo dello strato di 130 µm non dovrebbe essere superato a causa del pericolo di fessure.
- (7) Spessori minimi secondo SN 237 240.
- (8) Gli strati di copertura necessari dipendono dalla durata protettiva auspicata e dal tasso di asportazione previsto nonché dall'ammontare dell'investimento necessario. In caso di costruzioni esposte agli agenti atmosferici, il tasso di asportazione annuale per la classe di corrosività da 1 a 3 è di 1...5 µm.
- (9) La pulizia può essere effettuata soltanto con getti al minerale.
- (10) Sono necessari sia la chiusura dei pori che un rivestimento supplementare.
- (11) In questo caso vengono solitamente impiegati dei rivestimenti molto spessi. Alcuni sistemi di rivestimento molto spessi possono essere applicati direttamente e senza rivestimento di fondo sulla superficie in acciaio pulita.

Struttura base			Zona d'applicazione			
codice	spessore minimo dello strato	grado di preparazione della superficie	A interno asciutto, con il 70% di umidità relativa e senza acqua di condensa	B interno umido, con sporadica formazione di acqua di condensa o all'esterno-sotto tetto	C all'esterno, sottoposto agli agenti atmosferici	D all'interno e all'esterno, permanentemente sottoposto al carico d'acqua
P1 e P2 (2)	30 µm	Sa 2				
P1 e P2 (2)	60 µm	Sa 2	3			
M1 (2)	60 µm	Sa 2 o St 3				
M2 (2)	60 µm	Sa 2 o St 3				4
Z1	30 µm	Sa 2½	3			
Z1	60 µm	Sa 2½				
Z2	30 µm	Sa 2½	3			
Z2	60 µm	Sa 2½				
ZS	60 µm	Sa 2½ (5)		6	6	
F	(7)	decapare	3	8	8	
S	50 µm	Sa 3 (9)		10	10	10
spessore minimo dello strato del rivestimento complessivo			30, rispet. 60 µm	90 µm	120 µm	300 µm (11)

strato di copertura necessario	strato di copertura non necessario	non usuale o insufficiente
--------------------------------	------------------------------------	----------------------------

Tabella 5.3 Rivestimenti e coperture usuali con una classe di corrosività 1...3 (atmosfera normale e localmente senza aumento degli influssi aggressivi [5.6]).

Le annotazioni (2) fino (11) si trovano di lato [5.6].

Per ottenere una durabilità sufficiente sono necessari, oltre ad una buona protezione della superficie, anche dei provvedimenti costruttivi. Anche in questo caso B3 contiene dei principi da tenere in considerazione, come ad es. quelli riguardanti la protezione contro la corrosione dei mezzi di giunzione. La qualità della protezione contro la corrosione deve corrispondere a quella della costruzione. I mezzi di giunzione zincati elettroliticamente dovrebbero essere ulteriormente rivestiti mentre per quelli zincati a caldo si può, a seconda dei casi, rinunciarvi. Un'ulteriore possibilità consiste nell'impiego di acciaio inossidabile.

### Alligazione dell'acciaio

La capacità autoprotettiva contro la corrosione del materiale da costruzione può essere aumentata mediante un'alligazione dell'acciaio. A questo riguardo esistono le seguenti possibilità:

- acciai inossidabili (cromo, nichel) ed
- il cosiddetto acciaio ramato resistente agli agenti atmosferici (tipo «Corten», «Patinax» ecc)

Gli acciai inossidabili sono costosi e vengono impiegati solitamente solo per i mezzi di giunzione. In Svizzera, il cosiddetto acciaio resistente agli agenti atmosferici, ha trovato applicazione soprattutto nella costruzione di ponti. Riferimenti alle esperienze in materia si trovano nella letteratura, ad es. [5.12].

### Modifiche degli influssi ambientali

Di regola non è possibile cambiare gli influssi ambientali dannosi. In casi particolari è però possibile influenzare positivamente il microclima. Come accennato nel cap. 5.2 nel caso in cui si è in presenza di superfici in acciaio costantemente asciutte la corrosione non avviene. Questo semplice principio può essere applicato soltanto in casi particolari e ciò soprattutto alle nostre latitudini con un'umidità dell'aria relativamente alta e per opere costruttive tipiche per il nostro paese. Di seguito accenniamo ad un caso del genere. Si tratta delle sovrastrutture in acciaio dei ponti Farø, lunghi complessivamente 3 km, in Danimarca (figura 5.10). In questo caso le riflessioni sulla protezione contro la corrosione ed il relativo mantenimento con i rispettivi costi sono stati determinanti per la scelta della sezione trasversale della sovrastruttura [5.10]. I costi per la protezione contro la corrosione per ponti in acciaio rappresenta una parte

importante dei costi complessivi. Gli stessi ammontano generalmente a ca. il 10% dei costi per la sovrastruttura.

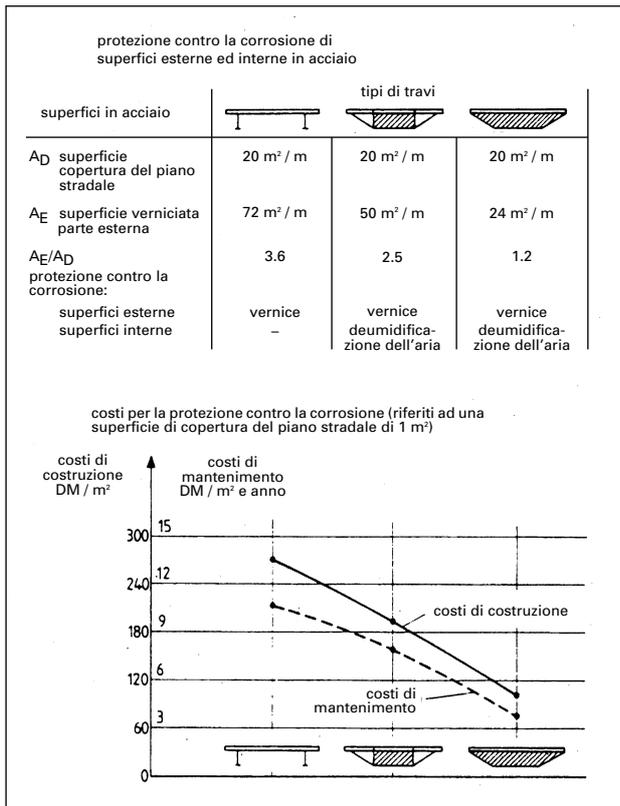
La quota parte dei costi per i provvedimenti di protezione contro la corrosione ammonta a ca. il 50% dei costi di mantenimento della sovrastruttura.



Figura 5.10 Veduta aerea dei ponti Farø [5.11].

Come illustra la figura 5.11 la trave scatolata è economicamente conveniente nel caso in cui le superfici interne con le innumerevoli lamiere di rinforzo non devono essere **verniciate** e se la resistenza della protezione contro la corrosione può essere garantita attraverso una continua **deumidificazione dell'aria**.

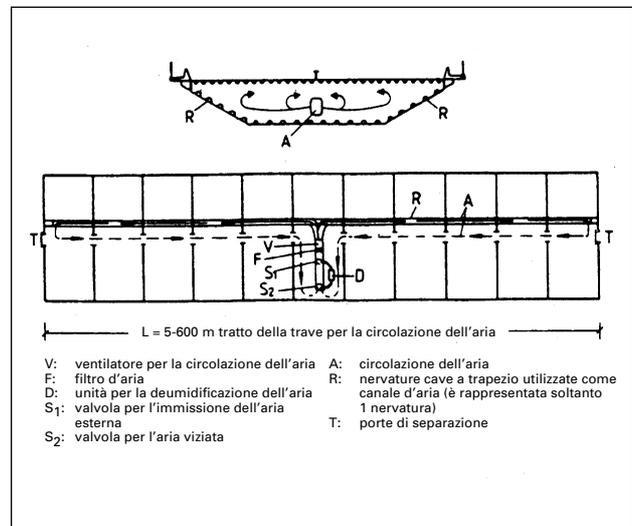
Questo concetto poco tradizionale è stato tra l'altro applicato per la prima volta nel 1970 sul ponte sospeso della Kleinen Belt pure in Danimarca. Le esperienze fatte a tutt'oggi sono estremamente positive.



**Figura 5.11** Protezione contro la corrosione di superfici in acciaio esterne ed interne per vari tipi di sezioni trasversali: superfici in acciaio e costi. L'ultima sezione trasversale è stata scelta per i ponti Farø. Dei complessivi 400'000 m<sup>2</sup> di superficie in acciaio ca. 320'000 m<sup>2</sup> sono collocate all'interno della trave scatolata e vengono protette contro la corrosione mediante deumidificazione dell'aria; soltanto i restanti 80'000 m<sup>2</sup> di superfici esterne necessitano di una verniciatura. Nel diagramma sono indicati i costi di protezione contro la corrosione al momento della costruzione e durante la fase d'esercizio su un lungo periodo dai 50 fino a 100 anni, riferiti ad 1 m<sup>2</sup> di superficie del piano stradale [5.10]. Osservazione: i risultati non possono essere trasferiti direttamente ad altri casi. L'economicità delle strutture composite usuali in Svizzera non è comunque messa in discussione.

Anche per i ponti Farø è stata adottata questa soluzione. Mentre le superfici esterne sono protette in modo tradizionale con uno strato di fondo in si-

licato di zinco etilico e da 3 a 4 strati in gomma clorurata, all'interno dell'elemento scatolato circola aria deumidificata (figura 5.12). La deumidificazione dell'aria avviene tramite filtri igroscopici. Il fabbisogno di aria supplementare fresca dipende dalla equilibratura della pressione tra atmosfera esterna ed interna oppure, in caso di ispezione, per il miglioramento della qualità d'aria nell'elemento scatolato.



**Figura 5.12** Sistema di deumidificazione e di circolazione all'interno dell'elemento scatolato [5.10].

In tutto il settore della trave sono installati 6 impianti di deumidificazione. Anche le scatole in acciaio alle estremità dei piloni del ponte sospeso che accolgono l'ancoraggio delle funi di sospensione, sono interamente protette contro la corrosione con un piccolo impianto di deumidificazione. Questo concetto innovativo viene applicato in casi particolari anche per la protezione temporanea o permanente contro la corrosione di armature per cemento precompresso. Questo provvedimento è tra l'altro applicabile anche in costruzione di cemento armato per la deumidificazione di cavità impedendo quindi un'ulteriore corrosione dell'armatura.

### Protezione catodica contro la corrosione

In Svizzera questo procedimento viene utilizzato anche per tubazioni e contenitori interrati che servono per il trasporto e l'immagazzinamento di sostanze pericolose per la sicurezza e l'ambiente. In questa sede si rinuncia alla presentazione di questo tipo di protezione. Per ulteriori indicazioni si rimanda alla letteratura ed alle direttive [5.7 - 5.9].

In coda a questo capitolo è segnalata anche la sempre più accresciuta importanza che riveste la **coloritura di superfici in acciaio**. Come illustrato nella figura 5.12 la protezione della superficie riceve quindi una doppia funzione. Ciò significa garantire la protezione contro la corrosione e nello stesso tempo assicurare le **esigenze estetiche**. A seconda del caso, si parla quindi della **durata di protezione** e della **durata funzionale estetica**.

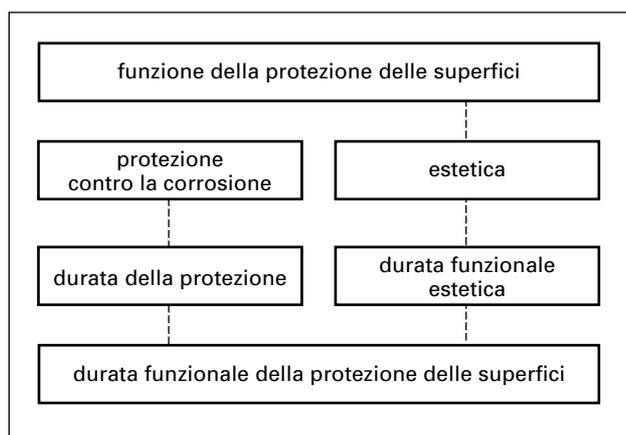


Figura 5.12 Funzioni della protezione delle superfici [5.6].

Per un elemento costruttivo che deve soddisfare ampiamente o esclusivamente una funzione estetica, ad esempio parti in acciaio visibili in un edificio commerciale, la durata funzionale della vernice è preponderante. La stessa può essere considerata esaurita quando, da una distanza tipica di osservazione sono visibili, a occhio nudo, le prime modifiche perturbanti sulla superficie. La du-

rata della funzione estetica di una protezione della superficie è quasi sempre sensibilmente inferiore alla durata di protezione (per ulteriori indicazioni vedi [5.6]).

Le accresciute esigenze estetiche assegnate alle costruzioni in acciaio hanno portato, oltre che per altre motivazioni, allo sviluppo del sistema-duplex nel quale la zincatura a caldo viene completata con un rivestimento organico nel colore desiderato. Questo rivestimento ha inoltre la capacità di rallentare l'asportazione dello strato di zinco. Colori più chiari hanno di regola delle durate di funzione più brevi rispetto a quelli di colori scuri. In altre parole: in caso di colori più chiari per ottenere la stessa durata della funzione, lo spessore dello strato deve essere aumentato (ad es. da 80 m a 150 m).

## 5.4 Controllo e manutenzione

La protezione della superficie deve essere controllata e mantenuta periodicamente soprattutto per gli elementi costruttivi in acciaio esposti agli agenti atmosferici ed aggressivi. Gli intervalli di controllo devono essere adeguati all'età della protezione della superficie, alla sollecitazione ed al rischio di danni alla funzione protettiva. In caso di sollecitazione normale deve essere effettuato un controllo ogni 5-6 anni.

Controllo e manutenzione sistematici (ad es. pulitura) prolungano la durata funzionale. Gli esperti incaricati devono essere in grado, in base alla progettazione e all'esecuzione, di riconoscere i punti deboli e l'incremento locale del carico e prendere provvedimenti idonei.

Indicazioni dettagliate sulle tecniche di analisi e di controllo della condizione sono contenute in [1.2] e nella B3.

## 5.5 Rinnovamento

Oggi si conoscono i seguenti valori d'esperienza approssimativi sui periodi di rinnovamento dei sistemi di protezione della superficie:

- costruzioni all'aperto (ad es. ponti):  
20-25 anni
- costruzioni coperte (ad es. capannoni aperti, pensiline):  
30-40 anni
- costruzioni interne:  
fino a 50 anni e oltre

Come illustra la figura 5.5 nel rinnovamento delle costruzioni in acciaio si opera una distinzione tra **revisione** e **sostituzione**, nei due casi le stesse possono avvenire sia localmente che interamente.

La B3 definisce i due concetti come segue:

- **revisione:** sopra ai rivestimenti esistenti vengono aggiunti nuovi rivestimenti
- **sostituzione:** i vecchi rivestimenti vengono rimossi fino alla superficie in acciaio e dopo il trattamento preliminare di quest'ultima vengono applicati nuovi rivestimenti.

La decisione tra revisione e sostituzione e tra trattamento locale od intero necessita di una valutazione molto accurata in base ai seguenti criteri:

- concetto di manutenzione progettato
- risultati del controllo sulla condizione
- provvedimenti indispensabili, ad es. rimozione di depositi e di rivestimenti singoli staccati, sostituzione delle perdite di spessore degli strati, sostituzione locale o completa
- principi di progettazione, ad es. relativi al carico corrosivo, alle misure costruttive, al programma di costruzione, alla compatibilità delle caratteristiche chimico-fisiche, aspetto estetico e costi
- carico ambientale causato da procedimenti e prodotti previsti.

Nella **revisione** deve essere prestata particolare attenzione al fatto che il rivestimento esistente e quello nuovo devono essere compatibili tra di loro. Oltre alle analisi di laboratorio hanno dato dei buoni risultati anche i controlli della condizione su campioni modello (superfici di riferimento) dopo un ciclo annuale.

In caso di ripetuta revisione possono formarsi degli spessori complessivi talmente rilevanti da strappare il rivestimento.

Per la revisione dei cosiddetti acciai resistenti agli agenti atmosferici valgono gli stessi principi di quelli indicati per la protezione contro la corrosione dell'acciaio da costruzione non rivestito.

Per le **coperture metalliche** che devono essere **sostituite** va scelto un sistema protettivo diverso nel caso in cui la sostituzione della copertura non è possibile nell'officina. Ciò significa che la sostituzione di una zincatura a caldo è possibile soltanto in un reparto di zincatura.

Se si decide per la **sostituzione di un rivestimento** la questione del carico ambientale di-

venta sempre più importante soprattutto nel caso di rimozione della protezione esistente contro la corrosione con una pulitura a getto. Si raccomanda una tempestiva presa di contatto con gli uffici competenti affinché, già al momento della progettazione e nel bando dei lavori, possano essere rispettati i provvedimenti specifici di protezione ambientale. Tra queste misure di tutela ambientale si segnalano in particolare quelle volte:

- ad impedire le immissioni di polvere nella fase della pulitura a getto ad es. attraverso «l'imballaggio» della costruzione interessata con foglie in materiale sintetico
- alla raccolta di sostanze sporche derivanti dal getto; il deposito sui prati e nelle acque della sostanza sporca o delle particelle di rivestimento, soprattutto quelle con pigmenti in metalli pesanti tossici, provocano un pericolo di intossicamento per animali
- ad impedire che nella sverniciatura alcalina le acque di scarico ed i residui prodotti entrino nelle acque, nelle canalizzazioni o nel terreno; ciò vale anche per le acque di scarico nelle pulizie con il getto d'acqua ad alta pressione
- allo smaltimento appropriato delle acque di scarico e dei rifiuti.

I pigmenti di metalli pesanti tossici sopraccitati si riferiscono al piombo nel minio. Nonostante le norme esistenti sulla protezione dell'ambiente un ulteriore impiego, in determinati casi, del minio o del silicocromato di piombo come protezione contro la corrosione è attualmente inevitabile. Le opere in acciaio costruite prima degli anni 1955 - 1960, presentano solitamente un rivestimento di fondo su base di minio. In edifici con presenza costante di persone come nelle aree di sosta e sui marciapiede delle stazioni più vecchie come ad es. Losanna, Olten o Zurigo, la sabbiatura dei vecchi strati è praticamente impossibile. Anche con i migliori provvedimenti di copertura il problema della polvere rimane difficilmente risolvibile. L'attuale stato della tecnica di protezione contro la corrosione permette, in questi casi, una revisione soltanto su base di minio o silicocromato di piombo.

Dove è possibile rimuovere il vecchio rivestimento in metallo pesante con la pulitura a getto, i settori interessati devono essere ricoperti in modo da limitare la fuoriuscita di polvere. I fondi dell'impalcatura devono essere impermeabilizzati e le impalcature medesime devono essere provviste di foglie in materiale sintetico. Nel caso di situazio-

ne climatica con forti correnti ventose può essere necessario il fermo dei lavori.

I lavoratori devono essere equipaggiati con respiratori che immettono pure aria fresca. I rifiuti di polvere devono essere raccolti e portati in appositi depositi.

Ulteriori indicazioni per il rinnovamento della protezione di superfici sono contenuti in [5.6].

---

## 6. Costruzione in legno

---

<b>6.1</b>	<b>In generale</b>	<b>118</b>
<hr/>		
<b>6.2</b>	<b>Meccanismi di invecchiamento e danneggiamento</b>	<b>119</b>
6.2.1	In generale	119
6.2.2	Influenza dell'acqua	119
6.2.3	Infestazione da funghi che distruggono il legno	121
<hr/>		
<b>6.3</b>	<b>Elementi costruttivi</b>	<b>123</b>
<hr/>		
<b>6.4</b>	<b>Misure ed effetti di protezione</b>	<b>126</b>
6.4.1	Configurazione costruttiva	126
6.4.2	Caratteristica costruttiva	126
6.4.3	Lavorazione	128
6.4.4	Protezione della superficie	128
6.4.5	Protezione chimica	130
<hr/>		
<b>6.5</b>	<b>Controllo, manutenzione e rinnovamento</b>	<b>131</b>

---

## 6. Costruzione in legno

### 6.1 In generale

L'utilizzo del legno come materiale da costruzione ha una lunga tradizione. Anche se nel caso di un impiego non conforme il legno reagisce rapidamente alle sollecitazioni dannose ed è di conseguenza ritenuto poco durevole, innumerevoli vecchi edifici di alcune centinaia di anni nel nostro paese dimostrano che questa reputazione è ingiustificata (figura 6.1).

Per l'utilizzo del legno è determinante una buona progettazione con un accurato sviluppo costruttivo della struttura portante ed un'esecuzione perfetta.

Il fatto che il legno «reagisce» rapidamente alle applicazioni sbagliate e che quindi fornisce un chiaro «feedback» ha portato, già da molti secoli, alla individuazione di una precisa tecnica protettiva. Per molti anni questa esperienza è in parte andata persa. Le varie possibilità vengono oggi impiegate nuovamente con successo.

Rispetto ai periodi precedenti sono oggi disponibili una gamma cospicua di materiali di alta qualità, ad es. profili di tenuta, mastici d'impermeabilizzazione, prodotti di verniciatura, prodotti impregnanti, foglie, legnami resistenti, metalli pro-

tetti o resistenti alla corrosione. La gamma dei provvedimenti di protezione si è quindi notevolmente ampliata (figura 6.2).

Oggi, quando si parla di misure o di sistemi protettivi delle costruzioni in legno si intende una «protezione integrale del legno» e si tenta di raggiungere un'ottimizzazione della durevolezza degli elementi costruttivi. Nel linguaggio corrente durevolezza significa «garanzia di funzionalità a lungo termine con una manutenzione opportuna. Ciò significa che nell'attività edilizia è compresa la manutenzione. Anche se la sorveglianza e la manutenzione non sono dei veri e propri provvedimenti protettivi le stesse sono comunque da considerare misure indirette integrate.

La durevolezza di una costruzione dipende quindi anche dai provvedimenti protettivi, dalla sorveglianza e manutenzione (come anche dal rinnovamento) che diventano pertanto compiti prioritari dei lavori di progettazione. L'accessibilità agli elementi costruttivi rappresenta pertanto, per non citare che un esempio, la garanzia non sempre scontata, di una corretta sorveglianza, manutenzione e rinnovamento.



Figura 6.1 Kappellbrücke a Lucerna, costruito nel 1333 [7.2].



Figura 6.2 Ponte costruito di recente con una protezione del legno attraverso elementi costruttivi progettati in modo accurato.

## 6.2 Meccanismi di invecchiamento e danneggiamento

### 6.2.1 In generale

Le indicazioni principali relative ai meccanismi di invecchiamento e danneggiamento nonché gli effetti inerenti i diversi materiali da costruzione, sono contenute nel cap. 2.3.

Gli effetti meccanici, climatici e chimici hanno di regola un'importanza subordinata. Per quanto concerne gli influssi climatici è comunque importante un buon assetto costruttivo.

Il legno è generalmente abbastanza resistente nei confronti di prodotti chimici ed è quindi un materiale da costruzione apprezzato soprattutto dove si è in presenza di un'atmosfera corrosiva che rappresenta un problema per altri materiali. Va comunque sottolineato che i mezzi di collegamento in metallo possono essere corrosi. È importante sottolineare che l'impregnazione protettiva del legno può influenzare la velocità di corrosione. Va inoltre osservato quanto segue:

- l'importanza determinante dell'umidità nel processo corrosivo
- il potenziale di pericolo in presenza di vari metalli nel legno
- l'effetto corrosivo dei sali contenuti eventualmente nei materiali ignifughi, nelle sostanze dei mezzi fungicidi, nel sale marino, ecc.
- la tensocorrosione intercrystallina di acciai «inossidabili» (acciai al cromonickel austenitici) in un'atmosfera contenente cloro.

Indicazioni dettagliate vedi [6.1] fino [6.3].

Nel nostro paese le influenze biologiche sulle costruzioni in legno, come ad es. l'attacco di insetti hanno un'importanza secondaria. Si deve comunque tener presente che ciò dipende dal tipo di costruzione e dall'elemento costruttivo interessato. Maggiore importanza deve essere attribuita all'infestazione **da funghi del legno**; fatto che si verifica comunque soltanto in determinate condizioni come illustrato nei cap. 6.2.2 e 6.2.3.

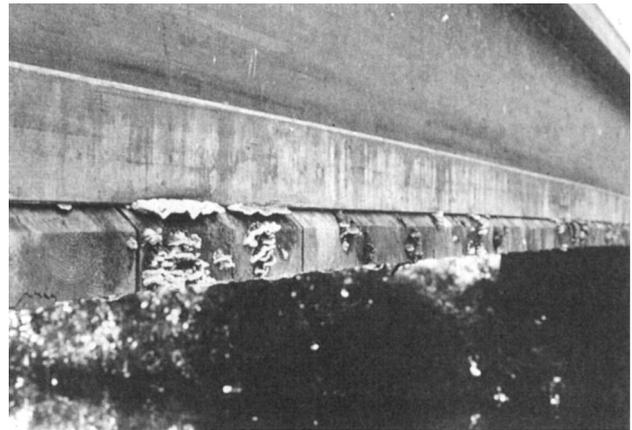


Figura 6.3 *Distruzione precoce, a causa dell'infestazione da funghi, di un ponte senza sistema protettivo.*

### 6.2.2 Influssi dovuti all'acqua

Contrariamente all'opinione diffusa, **l'acqua** non esercita un effetto dannoso sul legno. Non esiste comunque nemmeno una sola proprietà del legno che non sia influenzata dall'acqua, rispettivamente dall'umidità. L'influsso sul cosiddetto ambito igroscopico dell'umidità del legno è molto elevato. Lo stesso è compreso tra uno stato del legno perfettamente asciutto con un'umidità dello 0% (proporzione tra la massa dell'acqua nel legno e la massa del legno assolutamente senza acqua) e lo stato di saturazione delle fibre con un'umidità del legno del 27% - 35%, a seconda del tipo di legno (figura 6.4). In questo intervallo tutte le caratteristiche meccaniche e fisiche vengono modificate in modo sostanziale. Al di sopra dello stato di saturazione della fibra, cioè in quell'ambito in cui l'umidità supplementare viene depositata sotto forma di acqua nelle cavità della cellulosa, le caratteristiche delle proprietà del legno sono modificate soltanto minimamente. La peculiarità più importante di questo stato è che dal legno può essere eliminato il fungo (nel caso di umidità del legno al di sotto dello stato di saturazione della fibra ciò non è possibile).

Molti provvedimenti costruttivi vengono quindi applicati per evitare che il legno rimanga esposto per lunghi periodi all'umidità, rispettivamente al bagnato.

Ciò dipende naturalmente molto da dove viene incorporato l'elemento costruttivo in legno (vedi tabella 6.1).

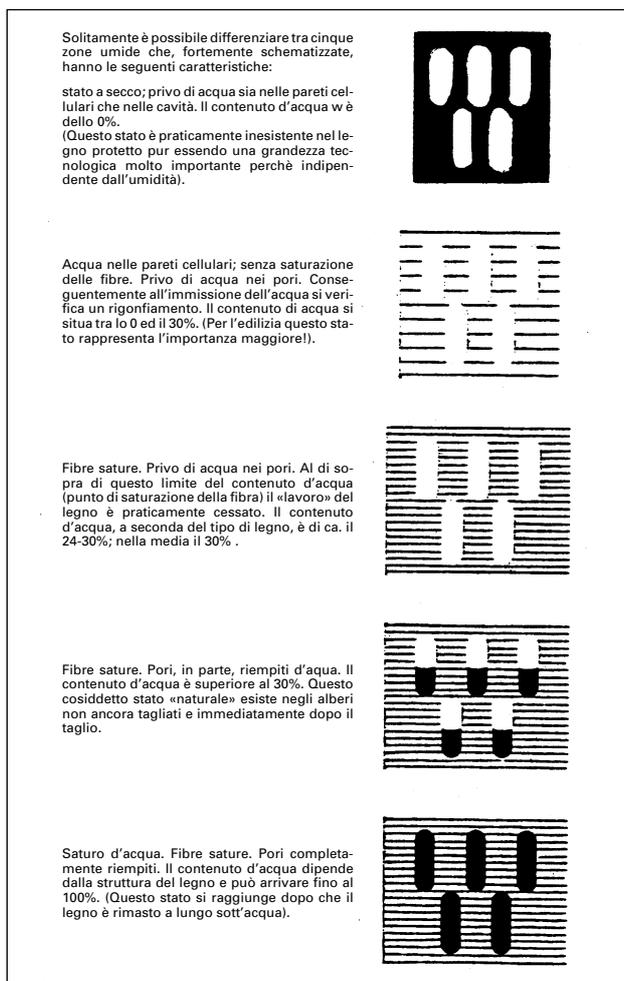


Figura 6.4 Settori con presenza di umidità.

Gli elementi costruttivi in legno sono in una permanente relazione dinamica di intercambio di umidità, soprattutto nell'ambito igroscopico, con l'ambiente. L'umidità e la temperatura dell'aria cambiano costantemente e il legno segue queste variazioni tentando di adeguare la sua umidità alle mutevoli condizioni ambientali (equilibrio dell'umidità del legno, figura 6.5). Un simile stato di equilibrio dell'umidità è raggiungibile soltanto in condizioni di laboratorio dove le condizioni ambientali vengono tenute costanti artificialmente. In realtà con le continue variazioni dell'umidità ambientale anche l'umidità del legno cambia conti-

nuamente nel tempo ed a seconda del luogo (all'interno di un elemento costruttivo). L'ubicazione assume quindi un'importanza decisiva per le condizioni di umidità e le variazioni della stessa nel legno (vedi tabella 6.1).

Il bilancio dell'umidità illustrato non comprende solo l'ambito igroscopico ma anche le umidità al

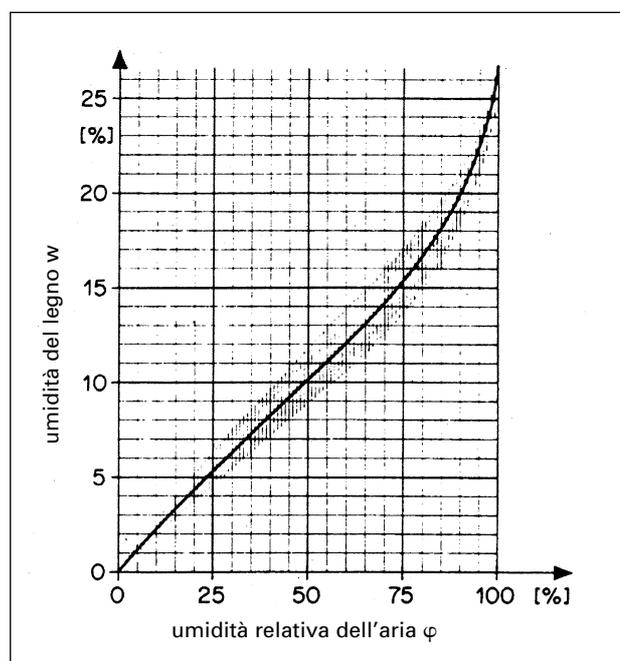


Figura 6.5 Stato di equilibrio medio dell'umidità del legno  $w$  e campo di dispersione in relazione all'umidità relativa dell'aria  $\phi$  nell'ambito della temperatura di 0..20°C.

di sopra dello stato di saturazione delle fibre. In pratica si può però affermare che in generale gli elementi costruttivi esposti agli influssi dell'acqua sono pochi. Ciò rappresenta comunque la condizione affinché l'umidità del legno si situi al di sopra dello stato di saturazione delle fibre.

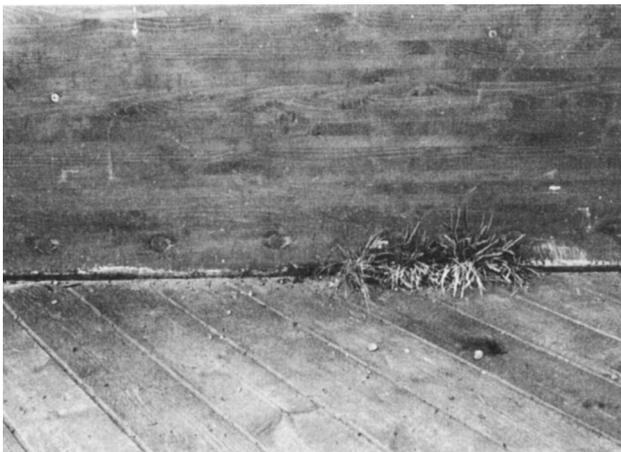
Delle gocce d'acqua si manifestano in caso di pioggia (su elementi costruttivi esposti alla pioggia), in caso di condensazione (raffreddamento dell'ambiente circostante) ed in caso di penetrazione d'acqua da elementi costruttivi e settori adiacenti (ad es. nei punti di contatto del legno con murature o suoli con presenza di umidità).

La questione dell'aumento del tenore d'acqua nel legno non può essere visto solo in relazione all'apporto d'acqua ma anche al parallelo fenomeno di essiccazione.

La promozione di un'essiccazione rapida è un provvedimento importante di protezione del legno.

I sintomi che indicano una permanente ed **elevata umidità del legno** con conseguente **pericolo di formazione di funghi**, rispettivamente l'esistenza di un attacco da funghi in corso e che possono insorgere soprattutto nelle opere di sottostrutture, sono i seguenti:

- colorazione scura della superficie (copertura intensiva della superficie con muffa di colore grigio scuro)
- scolorimento dovuto alla corrosione dei mezzi di giunzione
- ricopertura con muschio, licheni ed alghe (figura 6.6)
- crescita di erbe ed altre piante (spesso in relazione all'accumulo di sporcizia sulla costruzione)
- comparsa di rigonfiamenti del legno
- superfici molli
- fuoriuscita di acqua causata da oggetti appuntiti conficcati o piantati nell'elemento costruttivo (coltelli, chiodi).



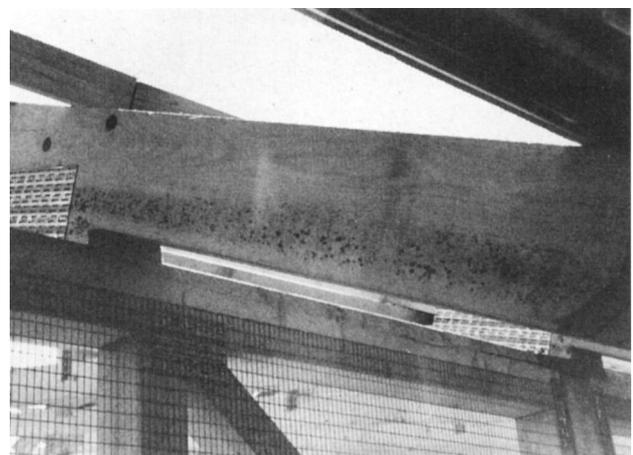
**Figura 6.6** La crescita di piante è spesso un segno sicuro di accumulo di sporcizia e umidità e di pericolo per la formazione di funghi sugli elementi costruttivi.

### 6.2.3 Attacco del legno da parte di funghi

L'impedimento di un'infestazione da funghi è uno dei compiti più importanti della protezione del legno.

La decomposizione del legno causata dai funghi è collegata ad una graduale perdita sia delle dimensioni che della resistenza. Svariati tipi di funghi sono in grado di distruggere il legno: i cosiddetti funghi che producono marciume bruno, marciume secco e marciume ammuffito. Gli stessi devono essere distinti dai funghi che determinano soltanto un cambiamento del colore del legno, ad es. aspergilli che causano la cosiddetta colorazione in blu del legno e quindi un peggioramento solo dal punto di vista estetico (figura 6.7).

Come già citato per una crescita di funghi è indispensabile un'umidità del legno al di sopra dello stato di saturazione della fibra. Per la formazione di funghi è necessario che lo stato di saturazione si manifesti per periodi prolungati (settimane). In caso di saturazione costante del legno con acqua, ad es. nelle costruzioni permanentemente in acqua, la crescita di funghi è impedita (e ciò è il motivo per cui i pali in legno sott'acqua hanno una grande durata). Le temperature elevate accelerano in modo notevole la formazione di funghi; le condizioni migliori di crescita si situano tra i 15° C ed i 35° C. Le temperature al di sotto del punto di congelamento non danneggiano i funghi anche se si interrompe la loro crescita.



**Figura 6.7** Gli aspergilli sulla superficie o all'interno del legno (colorazione in blu) non provocano un indebolimento del legno.

Nella sorveglianza considerata come provvedimento complementare per la protezione del legno, si tratta di individuare da un lato, i punti dove è presente un'umidità del legno accresciuta e quindi il pericolo di formazione di funghi e dall'altro lato, quelli in cui è già in corso l'infestazione. L'umidità del legno può essere misurata con una certa facilità con strumenti di misurazione dell'umidità del legno (misurazione della resistenza) (figura 6.8).



Figura 6.8 Strumento di misurazione dell'umidità del legno.

Valori di umidità del legno superiori al 22% indicano già un alto rischio di formazione di funghi perchè la possibilità che la misurazione avvenga proprio nel punto in cui c'è la più elevata presenza di umidità è minima. Tenuto conto che le zone minacciate da umidità elevate sono ridotte come estensione è importante indicare questi settori e procedere ad una misurazione. Strumenti di misurazione per l'umidità del legno con elettrodi più lunghi sono da privilegiare perchè permettono una misurazione in profondità. Se l'attacco da funghi è in uno stato avanzato sono visibili dei corpi fruttiferi dei funghi sulla superficie del legno. In uno stadio di sviluppo anteriore il riconoscere un'infestazione da funghi è difficile e necessita di maggiore esperienza. Ciò è riconducibile al fatto che,

nella maggior parte dei casi, il fungo si sviluppa nell'interno dell'elemento costruttivo (decomposizione interna) mentre la superficie si presenta in gran parte intatta. Accanto alle indicazioni menzionate nel cap. 6.2.2. relative ad un'umidità elevata del legno si possono citare ulteriori caratteristiche esterne per riconoscere l'infestazione da funghi:

- leggero avvallamento della superficie (diminuzione del volume)
- odore tipico
- suono cupo di vuoto quando si batte con un martello

Una diminuzione della resistenza del legno è verificabile nei seguenti modi :

- conficcare un'ascetta e produrre una rottura locale
- piantare dei chiodi (il legno marcito ha una resistenza minima)
- trapanare un buco, verificare la resistenza alla perforazione, valutare i detriti di perforazione
- carotaggio, (con trapano specifico) verificare la resistenza alla perforazione, valutare le carote.

Ulteriori metodi necessitano di un dispendio tecnico maggiore e strumenti speciali.

Nell'esecuzione dei controlli deve essere prestata una particolare attenzione al fatto di non creare degli ulteriori fori di entrata per l'acqua, (si raccomanda ad es. di forare dal basso). I fori di prova devono essere chiusi ed a questo proposito l'utilizzo di un tassello impregnato è raccomandabile. Per pali interrati è importante il rilevamento dello stato di conservazione sotto la superficie del terreno. Uno scavo dei primi 20-40 cm sotto il livello del suolo rende più facile una valutazione.

### 6.3 Elementi costruttivi

Il bilancio dell'umidità determinante per la crescita dei funghi dipende essenzialmente dal tipo, dalla grandezza, dalla posizione e dall'esposizione di un elemento costruttivo (figura 6.9). Nelle norme e direttive sono riscontrabili molteplici indicazioni sulle sollecitazioni, rispettivamente sulle classi di sollecitazione dei vari tipi di elementi costruttivi [6.2, 6.3]. Nelle costruzioni del genio civile sono indicate soltanto le classi di elementi costruttivi fortemente esposti da 2 a 5:

- 2: elementi costruttivi esterni sotto tetto, rispettivamente elementi costruttivi protetti dalla pioggia
- 3: elementi costruttivi esterni esposti alle intemperie
- 4: elementi costruttivi interrati, rispettivamente vicini al suolo
- 5: elementi costruttivi sott'acqua.

Per indicazioni di dettaglio vedi tabella 6.1.

Per raggiungere il nostro obiettivo gli elementi costruttivi sono visti da due prospettive differenti. La prima riguarda la sollecitazione climatica dei vari elementi costruttivi: gli elementi costruttivi non esposti agli agenti atmosferici, soprattutto quelli sotto tetto, sono di solito meno soggetti all'invecchiamento rispetto a quelli direttamente esposti alle intemperie influenzati da complesse sollecitazioni con effetti a catena [6.6, 6.7].

La seconda prospettiva è riferita alla sensibilità dei vari elementi costruttivi rispetto agli influssi atmosferici. Indipendentemente dai diversi sistemi protettivi, compreso l'impiego di tipi di legno duri o impregnati, gli elementi costruttivi hanno una sensibilità molto diversificata. Meno sensibile vengono considerati gli elementi costruttivi di formato ridotto e verticale, montati in modo da non impedire i movimenti di ritiro e di rigonfiamento a dipendenza delle variazioni dell'umidità (figura 6.10). Questi elementi costruttivi dimostrano solo una minima tendenza alla formazione di fessure, non provocano tensioni forzate ed asciugano rapidamente anche perchè in caso di esposizione intensiva alla pioggia ed all'umidità, l'acqua può defluire velocemente.

L'utilizzo di elementi costruttivi di formato grande, midollare ed orizzontale esposti direttamente alle intemperie risulta molto sfavorevole perchè, in caso di forte irraggiamento, sviluppano delle fessure in superficie nelle quali l'acqua piovana può accumularsi, stagnare e portare ad impregnazioni lo-

cali importanti. Attraverso un'essiccazione preliminare ed un'omogeneizzazione del materiale il legno compensato denota una tendenza meno accentuata alla formazione di fessure rispetto al legno massiccio. Con legno compensato vengono comunque fabbricati elementi costruttivi di grandi dimensioni i quali, in relazione al rischio di formazione di fessure ed al bilancio di umidità, presentano degli svantaggi. Esiste inoltre il pericolo di delaminazioni (apertura dei giunti incollati) soprattutto se l'incollamento non è stato eseguito in maniera ottimale (figura 6.11). Va tenuto presente anche il fatto che l'impregnazione preliminare delle lamelle in legno compensato per scopi protettivi esige un'incollatura molto accurata [6.6]. Nelle costruzioni in legno i giunti sono molto sensibili all'umidità non solo in relazione alla corrosione dei mezzi di collegamento, ma anche e soprattutto a causa delle «premesse geometriche» (buchi, sezioni non protette, ecc. nelle quali può penetrare ed eventualmente stagnare l'acqua) (figure 6.12 e 6.13).

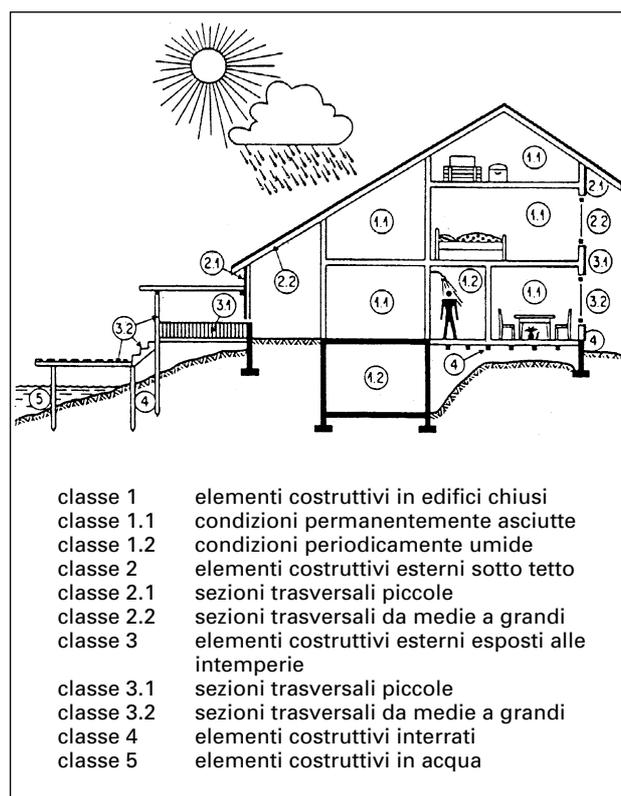
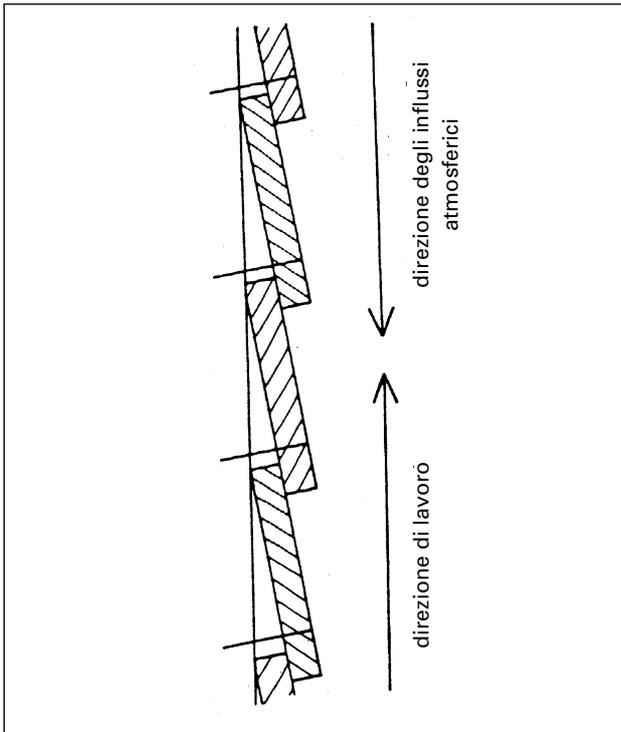
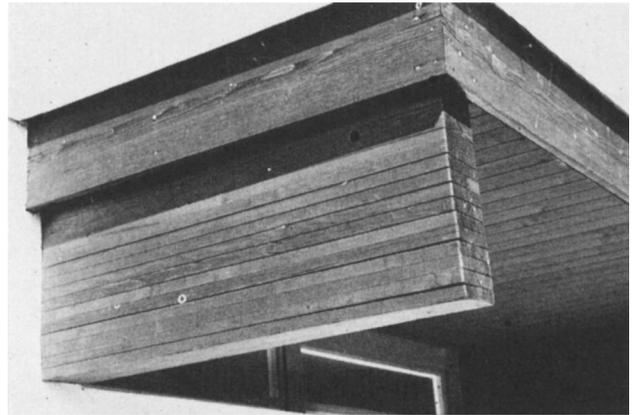


Figura 6.9 Classi di sollecitazione negli elementi costruttivi in legno.



*Figura 6.10* Armatura esterna che permette un libero movimento di ritiro e di rigonfiamento come anche un libero deflusso dell'acqua.



*Figura 6.11* Legno compensato, con un'esposizione intensiva agli agenti atmosferici e che a causa di un'incollatura insufficiente è sostanzialmente delaminato.

Classe	Sollecitazione	Umidità media del legno (%) *	Applicazione tipica in opere di sottostruttura	Rischio	Possibili misure protettive
2	elementi costruttivi protetti da influssi meteorologici diretti		elementi di ponti sotto tetto o ben coperti	incrinature da ritiro, eventuale delaminazione del legno compensato; nessun rischio di marcire	eventuale protezione della superficie
a)	profondità della sezione trasversale fino a ca. 1 cm	15 ± 5			
b)	sezioni trasversali da medie a grandi all'interno	14 ± 2			
3	elementi costruttivi esposti direttamente agli agenti atmosferici		elementi costruttivi di ponti non protetti		
a)	possibile locamente	fino a 25			
b)	sezioni trasversali piccole	16 ± 7	armature di copertura	danni dovuti ad agenti atmosferici, imbiancatura, formazione di fessure, se l'acqua ha la possibilità di defluire il rischio di marcire è limitato	concetto protettivo molto ampio (vedi 6.4)
c)	sezioni trasversali da medie a grandi in corrispondenza della superficie all'interno	16 ± 7 17 ± 3	elementi portanti	danni dovuti ad agenti atmosferici, formazione di fessure, rischio di marcire	un concetto protettivo molto ampio (vedi 6.4)
4	elementi costruttivi interrati o in vicinanza del suolo	> 25	sistemazioni paesaggistiche traversine pile dei basamenti appoggio dei ponti	marciume	impregnazione a pressione
5	elementi costruttivi in acqua	> 25	sistemazioni di torrenti e fiumi sistemazione paesaggistiche pali	gli elementi marciscono soltanto se non sono posati completamente nell'acqua	eventuale impregnazione a pressione

Tabella 6.1 Classi degli elementi costruttivi, sollecitazione e misure protettive.

\* (valore medio / larghezza dell'oscillazione)

## 6.4 Misure protettive e relativi effetti

Per la costruzione in legno esistono tutta una serie di provvedimenti tradizionali e nuovi con i quali dovrebbe essere, ed è possibile, garantire la funzionalità degli elementi costruttivi a lungo termine. Gli stessi possono essere riassunti come di seguito:

- configurazione costruttiva
- caratteristica costruttiva
- la lavorazione
- la protezione della superficie
- la protezione chimica, la protezione profonda, l'impregnazione a pressione

L'uso combinato di tutte le misure possibili è definito protezione integrale del legno.

### 6.4.1 Configurazione costruttiva

Mediante una configurazione costruttiva idonea è possibile diminuire o addirittura evitare una sollecitazione troppo forte (ad es. dovuta alla pioggia, all'irraggiamento solare o all'umidità del suolo). Ciò presuppone comunque che già nella prima fase di progettazione deve essere tenuto conto degli influssi ambientali comprese le condizioni climatiche locali. L'obiettivo delle misure strutturali è quello di sottrarre il legno agli influssi negativi, come quelli dovuti all'umidità ed atmosferici, ad es. con la scelta di un'ubicazione meno esposta, l'utilizzo di elementi costruttivi in calcestruzzo in corrispondenza del suolo ed una strutturazione dell'opera dotata di coperture, pensiline, ecc.

### 6.4.2 Caratteristiche costruttive

L'esperienza ha dimostrato che la strutturazione dell'opera è determinante per la durata di vita dell'elemento costruttivo o della costruzione medesima. Gli obiettivi di protezione del legno con elementi costruttivi sono:

- impedire la formazione di gocce d'acqua e soprattutto della penetrazione di acqua nella costruzione
- provvedere ad uno scarico rapido dell'acqua penetrata. Molto critiche sono le zone a contatto col suolo, dove arrivano gli spruzzi d'acqua; le incrinature da ritiro che si manifestano soprattutto nelle superfici orizzontali superiori; le parti frontali in legno e le superfici di contatto (trasporto dell'umidità per via capillare) (figura 6.13).

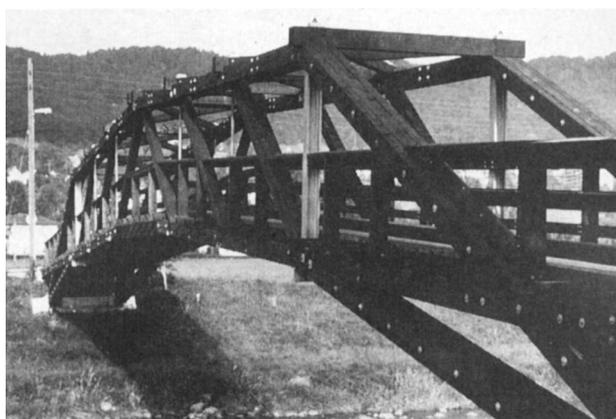


Figura 6.12 La struttura costruttiva è un primo passo importante per l'ottimizzazione del concetto protettivo. Le costruzioni a traliccio aperte e non ricoperte presentano molti dettagli «delicati» che possono essere difficilmente protetti (soprattutto i punti nodali).

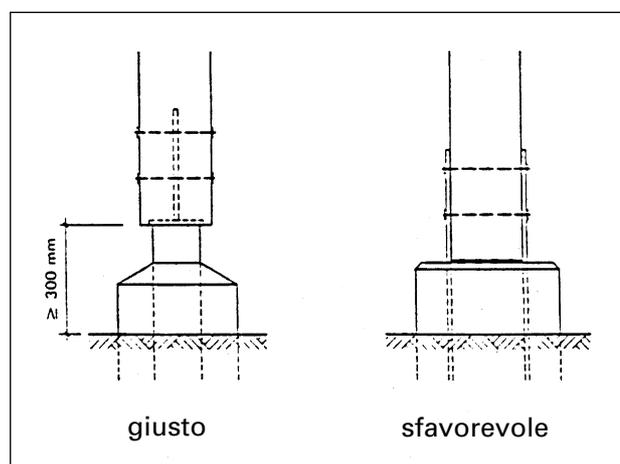
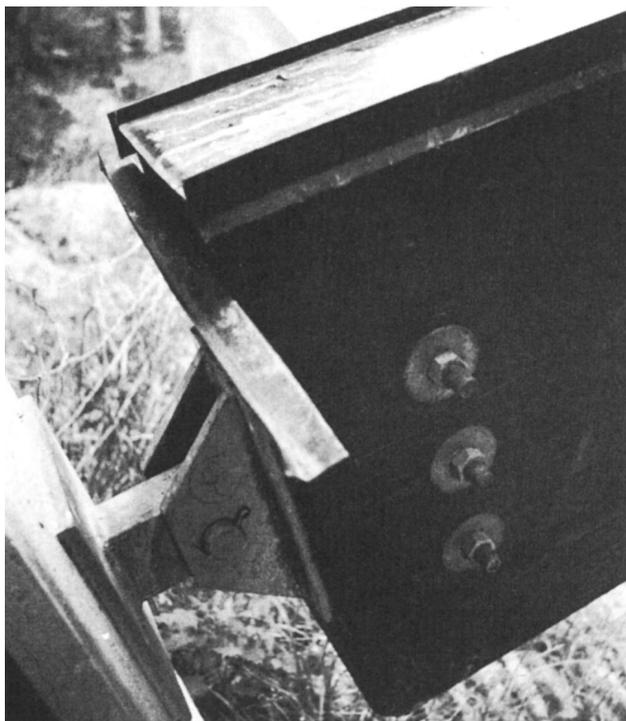


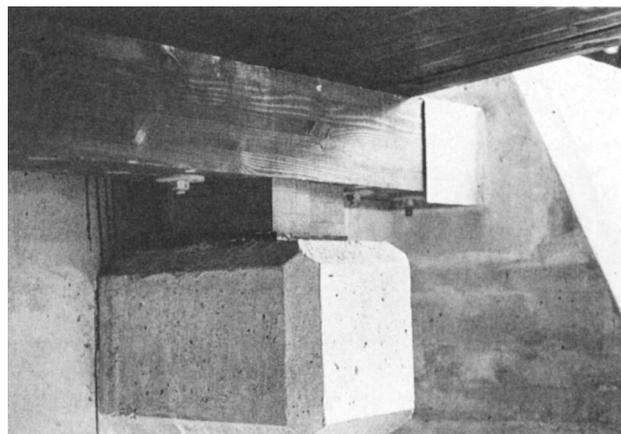
Figura 6.13 Con una progettazione idonea dei basamenti di sostegno all'aperto è possibile impedire un'assorbimento eccessivo di acqua piovana sulle superfici delle parti frontali del legno.

I provvedimenti costruttivi di dettaglio comprendono, tra l'altro:

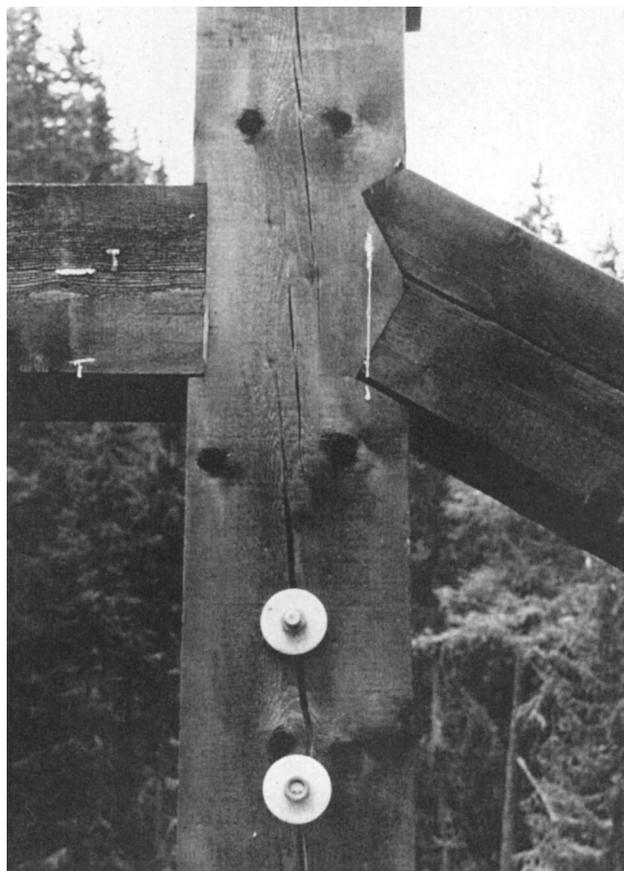
- tutti i sistemi di drenaggio (figure 6.14 e 6.15)
- la copertura delle superfici esposte
- la sistemazione di «barriere contro l'umidità» (ad es. foglie) per impedire il trasporto di umidità
- l'esclusione di dettagli «delicati» non protetti come ad es. punti nodali delle travi reticolari (figura 6.16)
- la messa in opera di provvedimenti per impedire l'accumulo di sporcizia con la conseguente formazione di umidità
- l'assetto della costruzione che permette di controllare ed eseguire la manutenzione degli elementi costruttivi senza difficoltà
- l'assetto della costruzione in modo da poter sostituire gli elementi costruttivi sottoposti a logoramento e compromessi nella loro durezza.



*Figura 6.14* Mediante una strutturazione idonea dell'appoggio questo elemento costruttivo esposto all'umidità può essere mantenuto asciutto evitando pertanto il rischio accresciuto di formazione di funghi.



*Figura 6.15* Vedi spiegazione alla figura 6.14.



*Figura 6.16* Elemento costruttivo esposto sfavorevolmente alle intemperie dove l'acqua piovana può penetrare per via capillare e stagnare.

### 6.4.3 Lavorazione

I provvedimenti tecnici di lavorazione comprendono:

- l'utilizzo di tipi di legno resistenti per elementi costruttivi particolarmente soggetti a danni: durame della quercia, castagno, robinia, larice
- l'utilizzo di legno sano (non intaccato da funghi o insetti)
- l'utilizzo di legno poco soggetto alla formazione di fessure: legno sprovvisto di midollo o per lo meno con midollo spaccato al centro (figura 6.17), piccole sezioni trasversali a forma di assi, legno già essiccato, legno compensato, sezioni trasversali con «scanalatura di scarico», ecc.
- l'utilizzo di legno impregnato (vedi cap. 6.4.5)

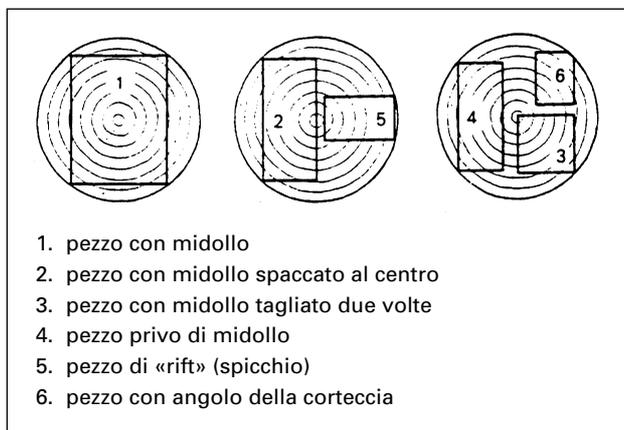


Figura 6.17 Tipi di taglio per legname squadrato ed assicelle.

### 6.4.4 Protezione della superficie

I trattamenti delle superfici hanno tre funzioni:

- la coloritura
- la protezione della superficie contro danni dovuti ad agenti atmosferici
- la diminuzione dell'assorbimento e dell'emissione di umidità.

Quest'ultima funzione protettiva non dovrebbe essere subordinata all'effetto strutturale (coloratura). Più un elemento costruttivo è sensibile e più deve rispondere ad una determinata dimensione, maggiore è l'importanza di questo compito (ad es. per determinate giunzioni). Anche nei settori non

direttamente esposti alle intemperie (ad es. travi trasversali di grande formato in legno compensato sotto una soletta chiusa di un ponte) i trattamenti della superficie per regolare il bilancio dell'umidità hanno un'importanza notevole.

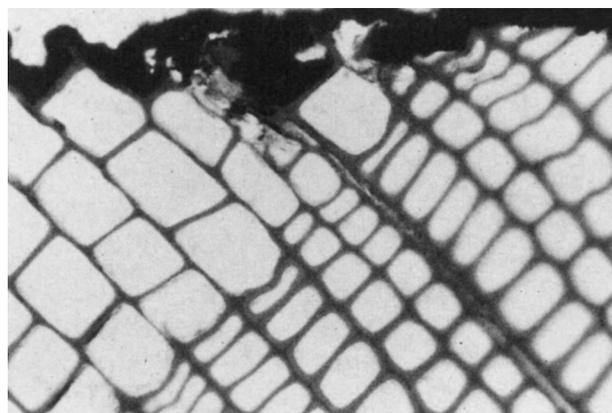


Figura 6.18 Ripresa al microscopio di una sezione trasversale di una superficie in legno trattata con una mano di impregnatura. La stessa è facilmente rinnovabile ma ha un effetto protettivo ridotto ed una durata di vita limitata.

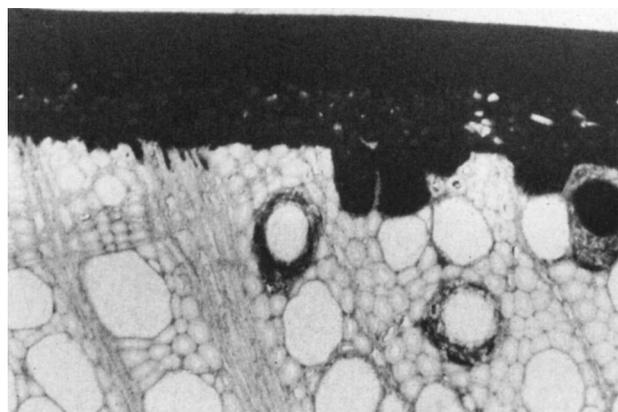


Figura 6.19 Ripresa al microscopio di una sezione trasversale di una superficie in legno ben protetta e trattata con una mano di vernice pigmentata e coprente. Una verniciatura siffatta ha una lunga durata di vita ma i costi in caso di rinnovo sono molto elevati.

Più il trattamento della superficie è spesso maggiore è l'effetto protettivo – in particolare l'azione inibente della diffusione –, la durata di vita ma anche i costi in caso di rinnovo. Il trattamento della superficie deve avere uno spessore minimo di 0.05 mm per avere il necessario effetto frenante del vapore. In Svizzera viene di solito utilizzato il sistema di verniciatura indicato come velatura di forte spessore, a base di resina alchidica che lascia trasparire la struttura del legno.

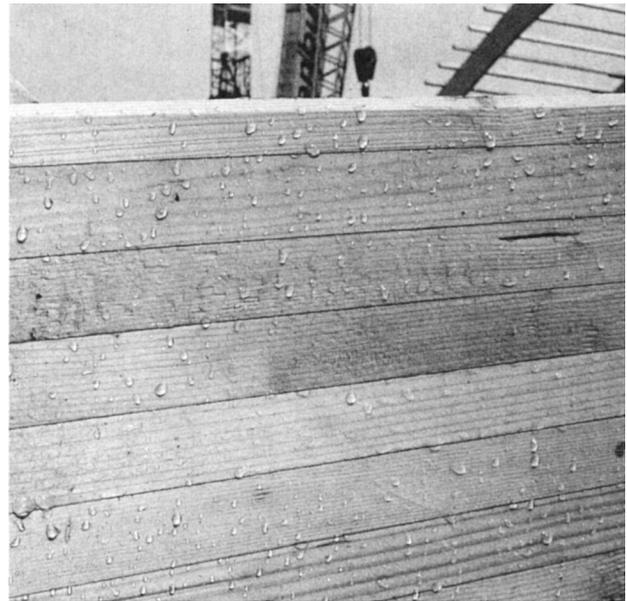
Il sistema è il seguente:

- trattamento base con eventuali aggiunte di prodotti antifungo e idrorepellenti
- trattamento intermedio con vernice a forte pigmentazione (protezione UV)
- ultima mano di forte spessore che forma, assieme alle prime due mani, un film molto ben visibile

Il legno compensato che già per motivi dovuti alla tecnica di lavorazione presenta un'umidità profonda del legno, deve ricevere una verniciatura protettiva già nell'officina, affinché l'assorbimento di umidità durante il trasporto, nel magazzino intermedio e nel montaggio sia il più possibile limitato (figura 6.20).

La durata di vita dei trattamenti protettivi della superficie dipende essenzialmente dallo spessore dello strato e dall'intensità della sollecitazione. Mentre una mano di vernice pigmentata e coprente può durare da uno a più decenni (figura 6.19), la durata di vita di una verniciatura impregnante (figura 6.18) dura, nelle stesse condizioni, soltanto da 2 a 10 anni (il valore superiore è riferito a luoghi protetti).

Indicazioni dettagliate sui prodotti vernicianti ed il loro impiego vedi [6.5]. Più che per altri tipi di provvedimenti protettivi, nei trattamenti della superficie, è indispensabile la regolare manutenzione ed il rinnovo per adempiere ai compiti protettivi richiesti.



*Figura 6.20 Travi in legno compensato protette contro l'assorbimento di acqua durante la fase di costruzione con una vernice impregnante idrorepellente.*

#### 6.4.5 Protezione chimica

Anche in caso di sfruttamento ottimale dei sistemi di protezione strutturale e costruttiva del legno e delle possibilità offerte dalla tecnica di lavorazione, in molte costruzioni usuali di opere infrastrutturali si raggiunge una limitata durata di vita. L'impiego di tipi di legno resistenti (quercia, castagno, robinia, noce o anche tipi di legno tropicale) diventa aleatorio a causa dei prezzi o per la non disponibilità sul mercato. In simili circostanze la protezione chimica dei tipi di legno usuali deve essere tenuto in debito conto. La protezione chimica del legno deve sempre fungere da supplemento e non può essere considerata come alternativa ad altri provvedimenti protettivi.

Un'efficacia soddisfacente dei trattamenti protettivi chimici è raggiungibile soltanto per mezzo di **procedimenti tecnici complessi** di impregnazione a pressione (vedi figura 6.21). Si raccomanda di utilizzare prodotti con il marchio Lignum (figure 6.22 e 6.23), [6.9].

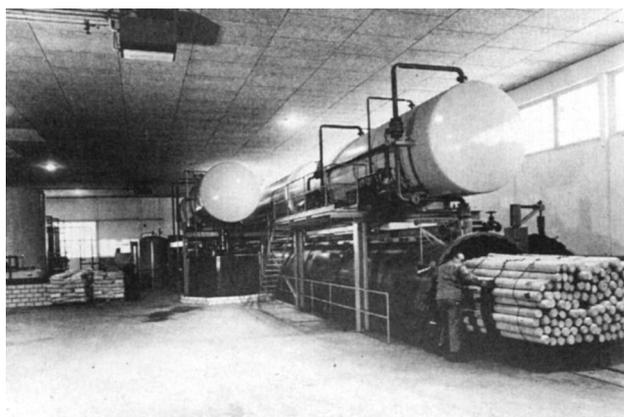


Figura 6.21 Impianto per procedimenti tecnici complessi di impregnazione a pressione sotto vuoto del legno.

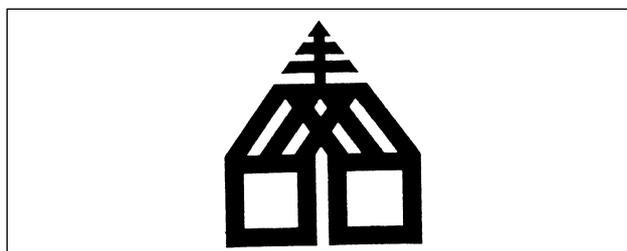


Figura 6.22 Contrassegno Lignum del marchio di qualità dei mezzi protettivi per il legno.

In Svizzera, per l'impregnazione del legno, sono utilizzati tre tipi di sistemi protettivi correnti:

- Soluzione salina protettiva acquosa a base di leghe CFR (cromo, fluoro e rame) e di CRB (cromo, rame e boro). Questi sali danno al legno un colore verdastro se non si aggiungono pigmenti di colore scuro. Questi sali protettivi vengono impiegati con successo da molti decenni per la protezione dei pali delle PTT e delle Aziende Elettriche.
- Molto efficace risulta pure l'olio di catrame a carbone fossile, con il quale vengono attualmente impregnate soprattutto le traversine. L'applicazione piuttosto limitata è riconducibile in particolare all'aspetto igienico ed all'emissione di odori sgradevoli.
- Le impregnazioni oliose di protezione del legno sono utilizzate soltanto in casi speciali in cui le sostanze attive vengono introdotte con solventi.

La scelta del tipo di legno e del taglio, la lavorazione ed il decorso ottimale della fabbricazione, rivestono un'importanza decisiva per la qualità e la durevolezza di elementi costruttivi con impregnazione a pressione.



Figura 6.23 Contrassegno Lignum del marchio di qualità per legno impregnato a pressione.

L'assorbimento delle sostanze protettive dipende, tra l'altro, dal tipo di legno. Va comunque osservato che l'impregnazione dell'alburno è molto più facile che non quella del cuore. Molto difficile risulta l'impregnazione del cuore dei durami; ciò vale anche per l'abete rosso, il legname da costruzione più diffuso. Il legno dell'abete bianco ha una impermeabilità ed una impregnabilità media. Una buona impregnabilità hanno il legno di faggio e l'alburno dei durami. Ne consegue che, più è presente legno d'alburno nella sezione trasversale dell'elemento costruttivo, soprattutto nel legname in tronchi e migliore risulta l'impregnazione. Nell'essiccazione tuttavia questo legno si spacca facilmente e le fessure si diffondono attraversando l'alburno anche se ben impregnato.

La formazione di fessure può essere limitata notevolmente e l'impregnazione migliorata se il legno in tronchi viene tagliato radialmente fino in prossimità del midollo (scanalatura di scarico).

Per ottenere un **trattamento ottimale** gli elementi costruttivi vengono impregnati soltanto dopo la lavorazione completa e provvisto di tutti i tagli e buchi necessari. In caso di lavorazioni successive le zone di taglio devono essere nuovamente trattate con i mezzi protettivi. L'efficacia protettiva di questi trattamenti della superficie è sensibilmente minore.

La durata dell'effetto delle impregnazioni dipende soprattutto dalla qualità e dalle dimensioni del dilavamento. In caso di un'impregnazione con sale ed olio di catrame si può calcolare con una durata dell'effetto da uno a più decenni.

Una condizione importante per il maneggio senza pericoli dei prodotti impregnanti è l'osservanza del tempo di fissaggio necessario dei sali protettivi durante il quale il sale si fissa sul legno e – a dipendenza di un fenomeno chimico – perde la maggior parte della sua tossicità. Temperature alte accelerano il fissaggio che dura, a seconda della temperatura d'immagazzinamento, da 3 a 8 settimane. Dopo il fissaggio i sali protettivi sono ancora dilavabili ma in quantità insignificanti.

Per l'indicazione di dettaglio sull'impregnazione vedi [6.5].

## 6.5 Controllo, manutenzione e rinnovamento

La sicurezza ed un'utilizzazione duratura possono essere garantite soltanto con un controllo regolare ed un'adeguata manutenzione. Le opere devo-

no essere progettate in modo da limitare e semplificare la manutenzione. Ne fanno parte in primo luogo provvedimenti che favoriscono la durevolezza di una costruzione. Gli elementi soggetti all'usura devono essere concepiti in modo da poter essere sostituiti con un dispendio minimo.

**Le cause principali** dei lavori di manutenzione e di rinnovamento delle costruzioni in legno in opere di infrastruttura e civili sono:

- il marcire del legno
- la corrosione di elementi costruttivi metallici
- il danneggiamento meccanico dovuto ad influssi naturali (frane, erosioni sotterranee, spinta del terreno, carico dovuto alla neve, gelo, caduta di alberi, caduta di sassi, ecc.)
- gli influssi dovuti all'uomo (utilizzo, usura, vandalismo)
- la limitazione delle condizioni di fruibilità veicolare e pedonale in particolare delle superfici transitabili scivolose
- la compromissione dell'aspetto estetico (ad es. colorazione parzialmente staccata).

I lavori di controllo e di manutenzione ottimali necessitano di una preparazione accurata e di un procedimento sistematico. Per garantire la continuità di conservazione è importante l'allestimento di documenti specifici inerenti la costruzione.

In un **piano di controllo** deve essere annotato che cosa deve essere controllato, quando, dove e quante volte questo controllo deve avvenire.

La frequenza dei controlli dipende dalle circostanze locali; a seconda delle condizioni e della sensibilità e dell'intensità di sollecitazione della costruzione gli intervalli di controllo sono auspicati tra i 2 e 5 anni.

Un piano di controllo può, ad es., comprendere i seguenti punti:

- zone umide o bagnate e quindi minacciate da funghi
- infestazione da funghi
- infestazione da insetti
- resistenza delle ringhiere
- danneggiamenti esterni (dovuti anche ad influssi meccanici)
- predisposizione alle oscillazioni
- deformazioni/spostamenti di tutta la struttura portante o parti della stessa
- accoppiamento dei mezzi di giunzione
- corrosione dei mezzi di giunzione in metallo

- imbrattamento, accumulo di materiale del suolo, terra, fogliame, ecc.
- mordenza della superficie di transito
- trattamenti della superficie di elementi costruttivi in legno
- modifiche d'uso

Il rilevamento tempestivo di umidità stagnante nei settori minacciati dalla formazione di funghi o già infestati è molto importante per evitare danni maggiori.

Indicazioni sul rilevamento di queste zone si trovano nei cap 6.2.2 e 6.2.3.

I rilevamenti sistematici devono impedire che, durante i lavori di controllo, «qualcosa possa sfuggire». I relativi mezzi d'appoggio sono liste di controllo, tabelle, verbali preconfezionati, combinazioni di liste di controllo e formulari di registrazione ecc. Gli stessi facilitano anche il controllo sistematico dell'efficacia dei provvedimenti di manutenzione.

I **lavori correnti minori** di manutenzione comprendono, con particolare riferimento alla protezione del legno ed alla durevolezza, i seguenti punti:

- pulire laddove l'accumulo di terra, fogliame ecc. può provocare degli effetti dannosi (ad es. scivolosità della superficie di transito, accumulo di umidità in prossimità di elementi costruttivi in legno e giunzioni metalliche)
- controllare ed eventualmente riparare le impermeabilizzazioni e le coperture
- serrare gli elementi di giunzione allentati
- migliorare la superficie di transito, livellare e rinnovare i provvedimenti antisdrucchiolo
- rinnovare i provvedimenti anticorrosivi
- sostituire i piccoli elementi difettati
- rinnovare il trattamento della superficie di legno
- rimettere in ordine gli elementi costruttivi deformati e spostati
- pulire e riparare le tubazioni di drenaggio

In caso di **rischio di formazione di funghi ed infestazione** possono rendersi necessari i seguenti provvedimenti:

in zone con un'umidità permanentemente elevata ed una infestazione da funghi limitata:

- impedire, se possibile, l'infiltrazione di acqua
- favorire l'essiccazione
- collocare delle cartucce di boro come protezione chimica del legno

in caso di infestazione intensiva da funghi:

- sostituzione degli elementi marci, preferibilmente con legno impregnato o resistente ai funghi
- migliorare costruttivamente la zona interessata.

Quando si è in presenza di un'infestazione intensiva da funghi in una zona critica di una struttura portante può essere necessario ricorrere allo sbarramento dell'accessibilità alla costruzione medesima o parte della stessa.

Dalle spiegazioni sopraccitate si evince la grande importanza data alla **prevenzione** nelle costruzioni in legno. Ciò nonostante può essere necessario il **rinnovamento** di parti del sistema protettivo. La **protezione della superficie** è di regola rinnovabile. Nel cap. 6.4 si richiamano alcune indicazioni a questo riguardo. Deve essere garantita la compatibilità tra vecchi e nuovi mezzi protettivi. La protezione chimica delle costruzioni non può essere rinnovata.

Nelle costruzioni in legno è inoltre possibile rinforzare o sostituire abbastanza facilmente gli elementi costruttivi danneggiati. I dispositivi costruttivi di protezione come le coperture (tetti), le impermeabilizzazioni ed i drenaggi sono pure sostituibili.

---

## **7. Muratura in pietra naturale**

---

<b>7.1</b>	<b>In generale</b>	<b>134</b>
<b>7.2</b>	<b>Tipi di pietre naturali e murature</b>	<b>135</b>
<b>7.3</b>	<b>Meccanismi di invecchiamento e danneggiamento</b>	<b>141</b>
<b>7.4</b>	<b>Sorveglianza</b>	<b>144</b>
<b>7.5</b>	<b>Manutenzione e rinnovamento</b>	<b>145</b>

---

## 7. Muratura in pietra naturale

### 7.1 In generale

Le opere più antiche ancora oggi esistenti sono state costruite in pietra naturale ed alcune di loro hanno un'età superiore ad alcune migliaia di anni. Tra queste si può ad esempio citare il ponte Zhaozhou in Cina costruito quasi 2'600 anni fa con una durata d'utilizzo altrettanto lunga (figura 7.1). Il Pont du Gard presso Nîmes nel sud della Francia è stato realizzato negli anni 63-13 a.C.. Questo audace acquedotto romano con una lunghezza di 275 m, ha quindi un'età superiore ai 2'000 anni (figura 7.2). La durata d'utilizzo è stata di alcune centinaia di anni. Nell'ultimo secolo è stato preso in considerazione la possibilità di riparare e riutilizzare questo acquedotto. Il piano inferiore del ponte adibito al traffico stradale è stato realizzato soltanto nel 18. secolo [7.2].

Anche in Svizzera disponiamo di molti ponti degni di nota e di altre opere di infrastruttura e civili in pietra naturale (figure 7.3 e 7.4). Leonhardt afferma «il loro valore culturale e la bellezza degli antichi ponti in pietra sono indiscutibili e gli stessi meritano il nostro rispetto e la nostra cura. Se per la costruzione è stata utilizzata la roccia dura e se le fondamenta sono state costruite su sottosuolo compatto le volte e pile hanno resistito per millenni. Con la pietra naturale è possibile costruire dei ponti durevoli e di bell'aspetto. Purtroppo i costi di costruzione per i ponti in pietra naturale sono fortemente aumentati.

Se progettati accuratamente ed eseguiti a regola d'arte è possibile, che a lunga scadenza, i ponti in pietra naturale siano più convenienti dal punto di vista dei costi in quanto si conservano per secoli e necessitano di pochissima manutenzione a prescindere dal problema dell'inquinamento estremo dell'aria» [7.3].

Con l'introduzione del tipo di costruzione in calcestruzzo le pietre naturali utilizzate per gli elementi portanti hanno sempre più perso la loro importanza. In questo secolo sono stati principalmente eseguite solo delle murature di rivestimento. Ma anche questo tipo d'applicazione è attualmente quasi scomparso (nel circondario III delle FFS l'ultimo rivestimento venne eseguito negli anni 1967/68).

Ciò è da addebitare al fatto che fino ad oggi sono stati paragonati soltanto i costi effettivi di costruzione dimenticando quelli di mantenimento futuro che non sono inclusi nei costi di confronto con altre modalità.

Un ulteriore problema per le costruzioni in pietra naturale è attualmente rappresentato dalla mancanza di specialisti e di addetti esperti nel settore. In diversi cantoni alpini vengono comunque nuovamente costruiti, da parecchio tempo, muri di spalla in pietra tagliata sgrossata poco lavorata con giunti di malta irregolari e larghi. Ciò potrebbe eventualmente rappresentare un segnale che questo tipo di costruzione con l'impiego di metodi poco dispendiosi potrebbe riprendere il suo legittimo posto nella costruzione di opere murarie.



Figura 7.1 Ponte Zhaozhou presso Zhaoxian nella provincia Hebei, Cina, luce 37.02 m [7.1].



Figura 7.2 Pont du Gard presso Nîmes, acquedotto e ponte stradale [7.3].



Figura 7.3 Ponte pedonale sopra la Verzasca presso Lavertezzo in Ticino [7.3].

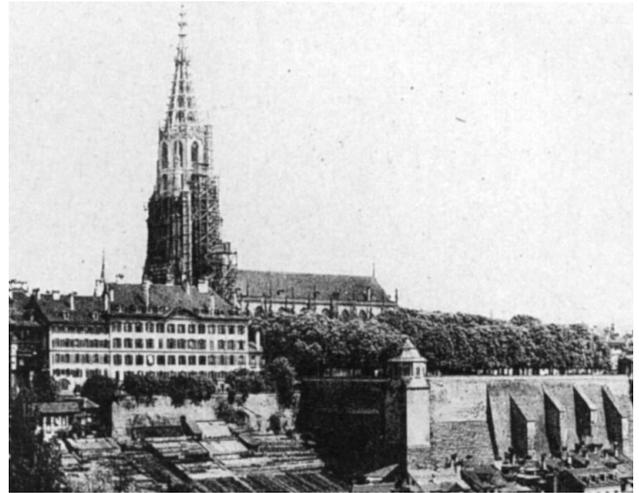


Figura 7.4 Muro di spalla della piattaforma di Münster a Berna.

## 7.2 Costruzione in pietra naturale e murature

La durezza delle costruzioni in pietra naturale dipende innanzitutto dalle caratteristiche delle pietre medesime. In relazione alla questione del mantenimento di queste costruzioni è quindi importante conoscerle.

Sui tipi di pietre naturali utilizzate nel nostro paese esistono poche indicazioni nelle norme Svizzere. A questo proposito la norma SIA 178, edizione 1980, muratura in pietra naturale [7.4] non contiene nulla di essenziale sul materiale in roccia medesimo e sulla sua idoneità come materiale da costruzione.

Sorprende inoltre il fatto che questa norma si occupi principalmente della progettazione e costruzione di nuove opere anche se al momento della sua elaborazione questo tipo di costruzione era quasi cessata. Per contro, **il settore della manutenzione delle innumerevoli costruzioni in pietra naturale esistenti non è trattato. Questa lacuna deve essere risolta nel prossimo futuro.**

In relazione alla **durezza** si fa comunque osservare che **devono essere utilizzate pietre resistenti agli agenti atmosferici ed una malta**

**resistente al gelo ed il più possibile impermeabile all'acqua**, anche se quest'ultima raccomandazione non è applicabile in tutti i casi.

È quindi necessario rispolverare la documentazione meno recente. Le opere standard di Quervain sono tra le più importanti [7.5, 7.6].

Nel punto [7.7] sono menzionate delle indicazioni importanti ad es. sui leganti per i giunti di malta e soprattutto sull'esecuzione di costruzioni in pietra naturale che rappresentano, in parte, ancora lo stato attuale della tecnica. Queste disposizioni che si fondano su direttive delle FFS del 1924, fanno riferimento a quelle per la costruzione della ferrovia del S. Gottardo dove la costruzione in pietra naturale ebbe uno dei periodi di massimo splendore.

La tabella 7.1 estratta dal punto [7.7] con indicazioni sui leganti dei giunti di malta può, nell'ottica di quel tempo, essere stata completa. Oggi possiamo per contro affermare che mancano le calce bianche e pozzolane (calci di trass) che non possono assolutamente mancare in una costruzione in pietra naturale. Indicazioni riferite a questi leganti si trovano, tra l'altro, nei punti [7.8, 7.9].

Leganti	Calci idrauliche		Cementi a presa rapida (qualità Grenoble)	Cementi Portland		Cementi di scoria		Cementi misti	
	Calci idrauliche leggere	Calci idrauliche pesanti		trazione	pressione	trazione	pressione	trazione	pressione
<p>Prodotti estratti da marne calcaree o calcri silicei mediante cottura al di sotto del limite di sinterizzazione, idratazione e frantumati sino ad ottenere una polvere</p> <p>Applicabilità generale</p>	trazione kg/cm <sup>2</sup>	pressione kg/cm <sup>2</sup>	<p>Prodotti estratti da marne calcaree o miscele sintetiche idonee composte di materiali argillosi e calcri mediante cottura al di sotto del limite di sinterizzazione e frantumati sino ad ottenere una polvere.</p> <p>Utilizzabili soltanto con l'accordo della direzione lavori per lavori complementari come ermetizzazioni, prosciugamenti, formature, ecc.</p>	trazione kg/cm <sup>2</sup>	pressione kg/cm <sup>2</sup>	trazione kg/cm <sup>2</sup>	pressione kg/cm <sup>2</sup>	trazione kg/cm <sup>2</sup>	pressione kg/cm <sup>2</sup>
	6	40		8	80	12	120	15	120
<p><b>la durezza della malta normale con consistenza di terra umida</b> (una parte in peso di legante su tre parti in peso di sabbia normale) nei 28 giorni determinanti di prova in acqua deve avere per lo meno:</p>	15 %	15 %	<p>5 %</p>	2 %	2 %	1 %	1 %	-	-
	kg/lit.	kg/lit.		kg/lit.	kg/lit.	kg/lit.	kg/lit.	kg/lit.	kg/lit.
<p><b>il peso specifico</b> presumibile riempito in modo sciolto allo stato di consegna è di:</p>	-	1,05	-	1,15	-	-	-	-	-
<p><b>finezza della macinazione</b> su un vaglio di 900 maglie e su 1 cm<sup>2</sup> e 0,1 mm di diametro del filo, il residuo deve essere al massimo di:</p>									

**Tabella 7.1**  
**Sommario sui leganti utilizzati in periodi precedenti [7.7].**  
 Nella tabella mancano le calci bianche e pozzolane, vedi, tra l'altro i punti [7.8, 7.9].  
 La tabella si basa ancora sul sistema usuale di misurazione precedente  
 (1 kg/cm<sup>2</sup> = 0.1 N/mm<sup>2</sup>).

Alcuni anni più tardi la società svizzera dei capimastri in collaborazione con le FFS elaborò delle direttive più estese [7.9]. Nelle stesse sono contenute, ad es., indicazioni sui tipi di muratura. Le figure 7.5 - 7.7 sono di aiuto per la valutazione di opere esistenti.

Un'ulteriore aiuto per la valutazione delle costruzioni in pietra naturale sono le indicazioni sul materiale in pietra che seguono [7.10]:

«L'applicazione e la lavorazione di pietre naturali per murature dipendono dalle varie caratteristiche del materiale in pietra come anche dalle possibilità di estrazione e dalle condizioni di trasporto.

Le caratteristiche principali da osservare nell'utilizzo di pietre naturali sono le seguenti:

- la **resistenza**, tenuto conto del fatto che generalmente la resistenza alla compressione viene indicata in kg per cm<sup>2</sup>.
  - La **resistenza agli agenti atmosferici**, decisiva per la durezza di un muro. Elementi costruttivi non protetti o comunque esposti all'umidità ed al gelo possono essere costruiti soltanto con pietre resistenti agli agenti atmosferici.
- Il riferimento determinante per la resistenza agli agenti atmosferici è rappresentato **dalla capacità d'assorbimento di acqua** della roccia. Le pietre che assorbono acqua vengono distrutte dal gelo perchè l'acqua, gelando, si dilata e provoca la rottura della pietra.

- Il **peso specifico apparente** rappresenta il peso di un'unità di volume della roccia così come si presenta.
- Il **peso specifico**, per contro, è calcolato in base al peso del materiale di costruzione completamente compatto, senza pori e cavità. Se il peso specifico apparente è sensibilmente inferiore al peso specifico ciò significa che la roccia contiene molte cavità. Si dice che la roccia ha una compattezza limitata. Una roccia siffatta assorbe generalmente molta acqua e non è quindi resistente agli agenti atmosferici (vedi tabella 7.2).

Per la lavorazione della pietra si ritengono importanti le seguenti caratteristiche:

- **stratiforme** è denominata una roccia che si spacca più facilmente in una direzione rispetto ad un'altra. Rocce che non possono essere spaccate in nessuna direzione prevalente vengono denominate **massicce**. Le pietre possiedono generalmente una resistenza più elevata alla

compressione trasversale che parallelamente verso la venatura.

Mediante la **spaccatura** di pietre stratiformi è possibile produrre con semplicità dei mattoni. Le pietre massicce possono essere, in parte, facilmente regolate col martello; per altre la lavorazione si presenta più difficile e le stesse devono essere **sgrossate**. Le pietre più molli, come le arenarie, possono essere frantumate. Per scopi particolari le pietre possono anche essere **segate**».

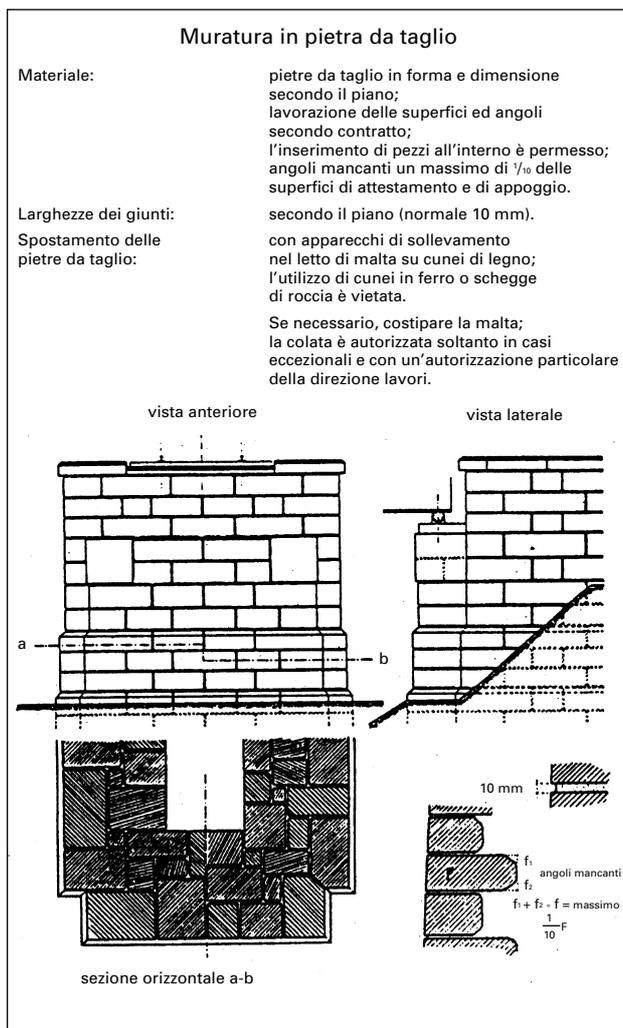


Figura 7.5 Muratura in pietra da taglio [7.10].

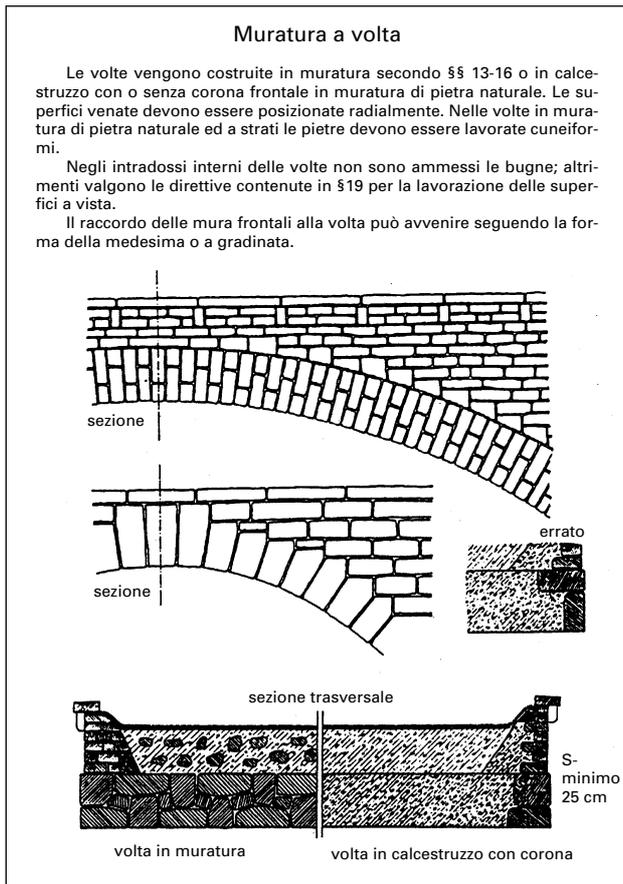


Figura 7.6 Muratura a volta [7.10].

Dal punto di vista attuale la citazione precedente può essere commentata come segue:

- L'opinione generalmente diffusa che si possono utilizzare soltanto rocce resistenti al gelo, è errata. Il pericolo di gelo è presente solo nelle rocce quasi sature di acqua e ciò può eventualmente essere il caso in corrispondenza dello zoccolo della muratura.
- Il concetto «peso specifico» è sostituito, conformemente alla raccomandazione SIA 381/1 (1980), parametri dei materiali da costruzione, con «peso specifico apparente».
- L'affermazione secondo cui una roccia con un assorbimento elevato di acqua non è resistente agli agenti atmosferici, deve essere relativizzata. Ad es. il tufo calcareo è una pietra da costruzione molto buona per determinati scopi di applicazione nonostante la grande capacità di assorbimento dell'acqua (volume dei pori del 20 - 40%).

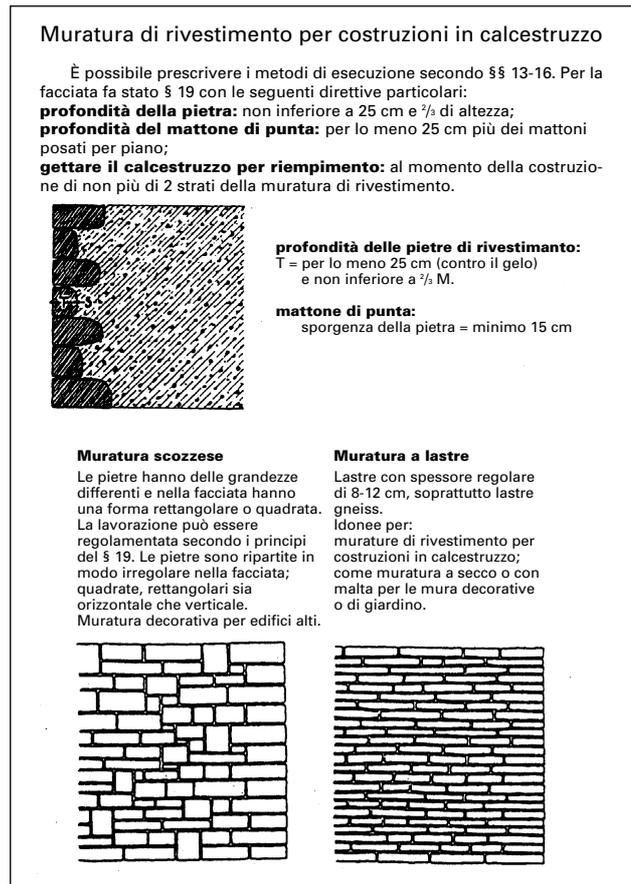


Figura 7.7 Muratura di rivestimento per opere in calcestruzzo [7.10].

La tabella 7.2 dà una panoramica sulle pietre da costruzione naturali svizzere più importanti nel passato. Le indicazioni contenute possono essere utili per la valutazione di vecchie costruzioni. Attualmente le stesse non dovrebbero essere prese in considerazione senza ulteriori verifiche. Quando si rende necessaria la sostituzione di pietre naturali in una costruzione nell'ambito di provvedimenti di rinnovamento, è importante partire dalla loro attuale disponibilità sul mercato. Un quadro attuale dell'offerta purtroppo non esiste. È comunque possibile far capo ad una tesi pubblicata nel 1983 che contiene una lista di cave svizzere e delle indicazioni sui materiali estratti [7.11].

Panoramica sulle pietre naturali da costruzione più importanti in Svizzera										
Tipo	Denominazione nel commercio	Luoghi e zone principale di estrazione	Struttura esterna	Struttura interna	Colore	Resistenza alla compressione, asciutto kg/cm <sup>2</sup>	Peso specifico apparente kg/dm <sup>3</sup>	Peso specifico kg/dm <sup>3</sup>	Assorbimento di acqua % del peso	Lavorabilità
granito	granito Gottardo granito Uri granito Andeer	<b>Uri:</b> Gurnellen, Wassen, Göschenen, <b>Grigioni:</b> Andeer <b>Valllese:</b> Monthey, Martigny	massiccia	granulare	bianco grigio verdastro	1600-2400	2,4-2,7	2,56-2,7	0,2-0,55	spaccabile in diverse direzioni senza grandi difficoltà
Gneiss	granito ticinese granito Verzasca bevoia	<b>Ticino:</b> Rodi, Faido, Chiggogna, Lavorgo, Bodio, Personico, Pollegio, Biasca, Iragna, Osogna, Lodrino, Cresciano, Claro Brione-Verzasca Vallemaggia: Ponte-Brolla, Cevio, Someo	da venata a levigata	granulare lenticolare	bianco grigio verdastro	1300-2100	2,55-2,64	2,62-2,71	0,21-0,72	spaccabile con molta facilità seguendo la venatura spaccabile in lastre sottili e uniformi
calcare calcare siltico	calce alpina pietra calcare blu	<b>San Galle:</b> Oberriet-Rheintal, Quintern, Weesen <b>Glarona:</b> Nüfels, Mollis <b>Lago dei quattro cantoni:</b> Brunnen, Seewen, Matt, Kehrsiten, Hergiswil, Rotloch <b>Lago di Thun:</b> Balmholz <b>Lago di Brienz:</b> Ringgenberg	spesso massiccia	grana fine	blu-scuro-grigio	2000-2700	2,62-2,67	2,66-2,73	0,04-2,8	facile spianatura
calcare compatta	pietra Lägern	<b>Sciaffusa:</b> Hemmental <b>Lägern:</b> Dielsdorf, Baden	spesso massiccia	quasi privo di grana	giallastro chiaro bianco, giallo chiaro grigio scuro (diventa grigio chiaro)	1600-1750 1400-2000	2,56-2,68	2,70-2,74	0,2-3,2 0,1-2,6	facile spianatura e sgrossamento
oolitica (gen. di natura calcarea)	pietra giurassiana marmo St.Triphon pietra Laufen	<b>Giura:</b> Läufelfingen, Soletta, Bienna, Reuchenette, Neuveville, Valengin, Chaux-de-Fonds <b>Vaud:</b> St.Triphon <b>Giura:</b> Laufen, Birslebach, Muttlenz, Balsthal	spesso massiccia	poroso	giallo, giallo scuro	1000-1500 1100-1500			0,6-5,5	facile spianatura e sgrossamento
calcare porosa	pietra Hauterive	<b>Neuchâtel:</b> Hauterive, St.Blaise	massiccia	quasi privo di grana	chiaro, giallo-grigio	1800-2100 1100-1800			0,1-3,4	facile spianatura e sgrossamento
da depositi calcarei animali (calce echinodermica)		<b>Vaud:</b> Villeneuve (Arvel), Bex <b>Valllese:</b> Colomby	massiccia							

**Tabella 7.2**  
*Panoramica sulle pietre naturali da costruzione più importanti presenti in Svizzera, stato attorno al 1930 [7.10]. Le indicazioni corrispondono allo stato di quel tempo e possono quindi essere utili per la valutazione di costruzioni esistenti. Nel frattempo sono subentrate delle grandi modifiche nell'attività riguardante l'estrazione e la lavorazione delle pietre naturali. In caso di nuove applicazioni deve quindi essere stabilito lo stato attuale della situazione. Indicazioni a questo riguardo sono contenute in [7.11]. In relazione ai tipi di pietra si rimanda ai punti [7.5, 7.6].*

Tipo	Denominazione nel commercio	Luoghi e zone principali di estrazione	Struttura esterna	Struttura interna	Colore	Resistenza alla compressione asciutto Kg/cm <sup>2</sup>	Peso specifico apparente Kg/dm <sup>3</sup>	Peso specifico Kg/cm <sup>3</sup>	Assorbimento di acqua % del peso	Lavorabilità
arenaria arenaria con granito (arenaria di Zugo)	pietra St. Margrethen arenaria Buchberg-Bollingen arenaria Zugo	<b>San Gallo:</b> Margrethen <b>Obersee:</b> Buchberg, Bollingen, Jona, Schmerikon, Urzberg <b>Zugo:</b> Menzingen, Lottenbach	massiccia	a grana fine	grigio-bluastro giallastro-grigio	500-800 500-1800	2,44 2,35/2,51	2,67 2,64/2,69	1,7-3,5 2,5-6,0	sgrossamento facile
arenaria calcare levigata	pietra Rorschach pietra Root	<b>San Gallo:</b> Stead-Rorschach <b>Lucerna:</b> Renggloch, Root, Rooterberg	levigata	a grana fine	verdastro-bluastro	800-1100	2,45	2,66/2,72	1,0-2,5	con la spaccatura è facile ottenere delle piastre
non stratificata (bernese)	arenaria Stockern arenaria Ostermundigen Sandspachstein	<b>Berna:</b> Stockern, Ostermundigen, Krauchthal, Oberburg <b>Friburgo</b>	massiccia	a grana fine	verdastro-grigio	250-400	2,15/2,26	2,67/2,72	5,5/7,6	si taglia e si sgrossa con facilità
ricco di calcare (appenzeliese)	Grés-Altalens Grés Corbières	<b>Appenzello:</b> Waldisaatt, Teufen <b>San Gallo:</b> Ebnat, Krumenau <b>Obersee:</b> Benken <b>Svizzera occidentale:</b> Attalens, Chexbres, Echarifens (Corbières)	massiccia	a grana fine	bluastro-grigio grigio-giallo-grigio-blu	1100-1700	2,66/2,67	2,73/2,78	0,3-1,0	facile sgrossamento
arenaria con quarzo (Flysch, ecc)		<b>Glarona:</b> Matt (Sernftal) <b>Uri:</b> Attinghausen <b>Obvaldo:</b> Guber (Alpnach) <b>Berna:</b> Mittoiz (Kandersteg), Schwarzenburg-Gurnigel <b>Friburgo:</b> Plasselb <b>Valliese:</b> Massongex, St. Gingolph <b>San Gallo:</b> Buchserberg, Sevelen <b>Nidvaldo:</b> Beckenried	massiccia	a grana fine	verdastro-grigio bluastro-grigio	1600-2700 1800-3400	2,60/2,69 2,66/2,70	2,66/2,75 2,72/2,77	0,05/0,20 0,23/0,44	facile spianamento
arenaria concorde	Seelaffe pietra Mägenwil pietra calcare concorde	<b>San Gallo:</b> Thal (Rorschach) <b>Argovia:</b> Mägenwil, Würenlos, Othmarsingen <b>Friburgo:</b> Seiry (Estavayer)	massiccia	a grana grossa	grigio-giallastro grigio-bluastro	350-900	2,10/2,58	2,68/2,71	1,1-4,0	facile sgrossamento
buddinga a grana fine	granito Appenzell	<b>Appenzello:</b> Herisau (Schachen) <b>San Gallo:</b> Degerheim <b>Zurigo:</b> Rütli	massiccia	pisolite	grigio chiaro	1400-1500	2,74	-	0,1-0,4	difficile spianamento
grossa		<b>Svitto:</b> Goldau (Bergsturz)	massiccia	pietra grossa	variopinto	-	-	-	-	difficile sgrossamento

**Tabella 7.2**  
*Panoramica sulle pietre naturali da costruzione più importanti presenti in Svizzera, stato attorno al 1930 [7.10]. Le indicazioni corrispondono allo stato di quel tempo e possono quindi essere utili per la valutazione di costruzioni esistenti. Nel frattempo sono subentrate delle grandi modifiche nell'attività riguardante l'estrazione e la lavorazione delle pietre naturali. In caso di nuove applicazioni deve quindi essere stabilito lo stato attuale della situazione. Indicazioni a questo riguardo sono contenute in [7.11]. In relazione ai tipi di pietra si rimanda ai punti [7.5, 7.6].*

### 7.3 Meccanismi di invecchiamento e danneggiamento

Le indicazioni essenziali sui meccanismi di invecchiamento e danneggiamento, utilizzabili per tutti i materiali da costruzione, sono contenute nel cap. 2.3. Anche per murature in pietra naturale vale il principio secondo cui gli influssi **esterni** ed **interni** possono causare dei danni. Gli stessi possono essere sia di origine **naturale** che **antropogena** cioè influssi provocati dall'uomo. Le pietre naturali si disgregano a causa di processi **meccanico-fisici, chimici e biologici** [2.12, 7.12, 7.13].

I fattori **interni** dipendono dal tipo di roccia così come presenti in natura. Gli stessi sono determinanti per la **capacità di resistenza** o per la **durevolezza** di una della pietra sottoposta ai medesimi influssi.

La composizione mineralogica fornisce in particolare le indicazioni sul **comportamento chimico**. La struttura a foglia, l'orientamento del minerale e soprattutto la porosità determina il **comportamento fisico** della roccia.

Per la muratura è importante anche **l'influenza reciproca dei diversi materiali**. Il grado di influenza dipende sovente dallo stato di umidità. Ad es. il calcestruzzo, rispettivamente il cemento Portland, non tollera l'arenaria. È noto che la durezza meccanica delle malte di cemento danneggia, nei punti di contatto, i materiali da costruzione più molli, e che i sali derivanti dalle malte di cemento corrodono le arenarie e le malte di calce vicine [7.14].

Per il comportamento a lungo termine della pietra naturale è importante anche **l'esposizione alle intemperie** o, in altre parole, se un elemento costruttivo è o meno esposto alla pioggia. In vicinanza del suolo possono avere, ad es., un'influenza sia l'umidità del suolo medesima che **le acque pendenti**, che trasportano quasi sempre anche dei sali.

Le forme più frequenti di danni alla roccia sono:

- sabbiatura
- sfogliatura
- formazione di incavi
- effervescenze, croste, formazione di incrostazioni da sali
- sgretolamento ad es. dell'arenaria

Le figure 7.8 - 7.12 illustrano delle immagini di possibili danni.

I danni si verificano in misura maggiore se le superfici della pietra non sono state lavorate a regola d'arte.

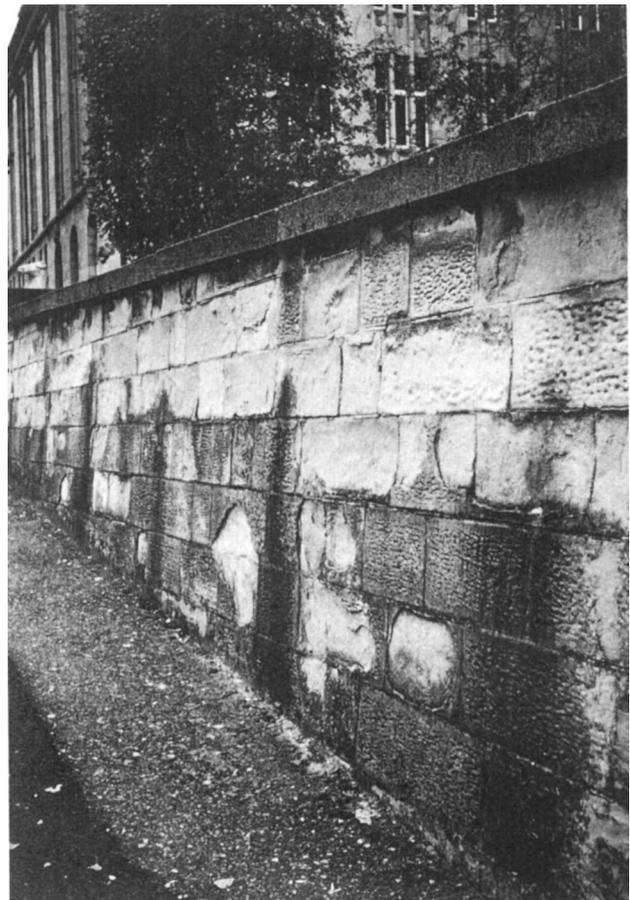
Per mantenere la funzionalità di una muratura in pietra naturale anche **lo stato dei giunti di malta** è importante. Gli stessi possono essere danneggiati soprattutto a causa della presenza di umidità permanente e della formazione di gelo. La malta di calce «vecchia» pura (calce spenta) è particolarmente oggetto a questo rischio.



Figura 7.8 Dissabbiatura caratteristica dell'arenaria bernese sulla Bundesterrasse a Berna.



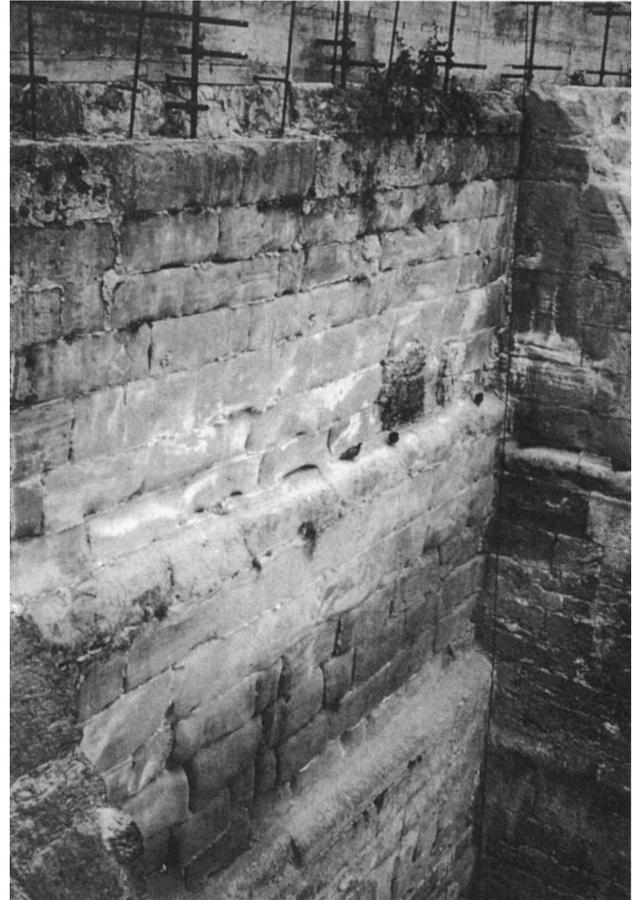
*Figura 7.9* Situazione di danno al ponte Nydegg; l'acqua discendente provoca una forte dis-sabbiatura a causa della cristallizzazione del sale.



*Figura 7.10* Formazione di incavature nell'arenaria su un muro di spalla a Zurigo.



*Figura 7.11 Rottura della muratura a causa della penetrazione di radici di una betulla sul «ponte in legno» a Olten.*



*Figura 7.12 Situazione di danno sul muro di spalla della piattaforma Münster a Berna; l'umidità con sali derivanti dal materiale di riempimento è uscita all'esterno e ha «corroso» in profondità l'arenaria.*

## 7.4 Sorveglianza

In relazione alla sorveglianza di cui fa parte il controllo (registrazione dei danni) e la valutazione della costruzione deve essere differenziato tra **costruzioni pubbliche in pietra naturale come gallerie stradali e ferroviarie e quelle in cui, accanto all'aspetto funzionale, si riconoscono dei valori di tutela monumentale e cioè dei valori culturali.** Di queste ultime possono far parte ad es. **ponti** importanti e ben strutturati e **costruzioni di appoggio** come pure **facciate di edifici in pietra naturale.**

La diversità consiste nel fatto che per le costruzioni in pietra naturale con caratteristiche monumentali è necessario procedere anche nel controllo con molta cautela. Un orientamento esclusiva-

mente tecnologico del modo procedurale può, ad es., portare ad un peggioramento inaccettabile dell'aspetto anche soltanto a dipendenza di asportazioni massicce di prove di carotaggio.

Per questo motivo è raccomandabile prioritariamente **l'ispezione visiva** per la registrazione dei danni [1.2]. Conformemente al punto [7.18] la registrazione dei danni dovrebbe essere solitamente eseguita in base ad un progetto che risponda alle caratteristiche del materiale con l'ausilio di una leggenda normalizzata (vedi figura 7.13). Come complemento sono molto utili le fotografie scattate prima della costruzione dell'impalcatura.

Se necessario, possono essere eseguiti ulteriori controlli su campioni di roccia in laboratorio.

Forme di alterazioni dovute ad agenti atmosferici /danni		Tipi di pietra/materiale	
	pietra naturale intatta		granito
	sbriciolamento leggero		calcare compatto
	sbriciolamento		arenaria bernese tipo A
	sbriciolamento accentuato		arenaria bernese tipo B
	formazione di incrostazioni		riquadatura
	formazione di incavature		inserimento di marna
	allentamento		rappezzi con malta di cemento della pietra naturale
	sgretolamento		intonaco
	efflorescenze		
	linee di scorrimento dell'acqua		
	licheni, alghe		
	fessure		
Provvedimenti di risanamento			
	pulire: spazzolare/aspirare/bagnare		
	consolidamento		verde-chiaro
	ripassamento: ripiallatura leggera / ripassare		
	rimodellatura con calce trass		giallo
	rimodellatura epossidica		arancio
	sostituzione della pietra naturale		rosso
	riquadatura		rosso
	sostituzione della pietra artificiale (combinata con cemento)		blu
	idrofobizzazione		verde-scuro
	lavoro di rappezzo con intonaco		

Figura 7.13 Leggenda utilizzata nella città di Berna che illustra i tipi di pietra, i danni ed i provvedimenti di risanamento [7.18].

Anche nel caso di costruzioni esclusivamente funzionali come ad es. i rivestimenti in pietra naturale di una galleria, **l'ispezione visiva deve essere posta in primo piano. Gli esami termografici** possono fornire indicazioni supplementari sullo stato del rivestimento e sulla dimensione dello stato dell'umidità o dei settori con apporto di acqua [1.2, 7.15]. È inoltre pensabile uno sviluppo delle analisi attraverso il perfezionamento di altri metodi come l'uso del georadar e dell'ultrasuono. Le indicazioni in merito così come quelle sulle tecniche di controllo del **carotaggio** (con successivi esami di laboratorio) e **dell'endoscopia** (ispezione delle cavità dietro il rivestimento) sono segnalate nel punto [1.2].

## 7.5 Manutenzione e rinnovamento

La **differenza** menzionata nel cap. 7.4 tra **costruzioni esclusivamente funzionali e le costruzioni in pietra naturale di carattere monumentale** è importante anche per la progettazione e l'esecuzione di provvedimenti di manutenzione e di rinnovamento.

Per le costruzioni **funzionali esistenti come le gallerie stradali e quelle ferroviarie** si tratta soprattutto di raggiungere un'adeguata solidità e, a seconda delle esigenze, una sufficiente impermeabilità, del rivestimento della muratura. A seconda degli influssi, ad esempio causati dai sali antigelo o da altri mezzi aggressivi, le superfici in pietra e i giunti possono essere più o meno disfatti o decomposti.

I **giunti difettosi** vengono accuratamente raschiati o lavati mediante dei getti d'acqua. Gli stessi devono essere puliti con sabbatura o getti d'acqua a pressione. Nell'esecuzione di questi lavori può eventualmente essere necessario di dover assicurare le singole pietre con cunei in legno provvisori. La nuova stuccatura dei giunti avviene quasi sempre in due fasi lavorative (vedi figura 7.14). Nella prima fase il giunto viene riempito, con malta idonea, nella zona posteriore. A questo punto deve essere stabilito se il cemento Portland appare indicato nel caso specifico o se altri cementi che legano la calce sono più idonei (ad es. cementi Trass). Il principio secondo cui la malta per giunti deve essere più molle della roccia, deve essere tenuto presente al momento della scelta del materiale. Nella seconda fase di lavoro viene introdotta una malta di cemento impermeabile con una

quantità maggiore di cemento e, se del caso, con un additivo per aumentare l'impermeabilità all'acqua, e levigata con un ferro per giunti. A questo punto devono essere asportati tutti i cunei in legno.

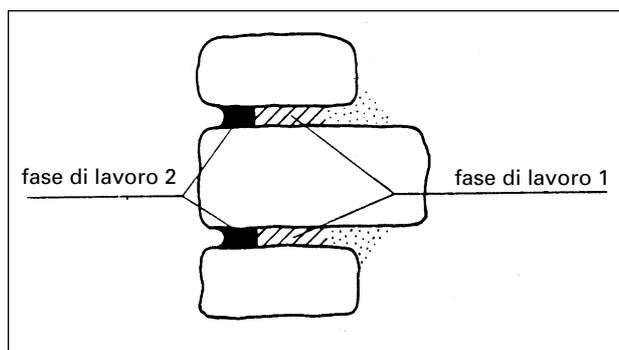


Figura 7.14 Nuova stuccatura dei giunti della muratura.

È inoltre possibile l'iniezione dei giunti in settori più estesi con una sospensione o una malta di cemento. Contemporaneamente le cavità tra muratura e roccia devono essere controllate in modo che le stesse possano essere riempite senza conseguenze negative. Nelle rocce debolmente freatiche questo provvedimento non presenta problemi. Per contro, nelle rocce fortemente freatiche, i corsi d'acqua naturali dietro la muratura non devono essere ostruiti perché la pressione d'acqua che si forma può avere delle ripercussioni negative sulla stabilità dell'opera.

Pietre singole o piccoli settori danneggiati della muratura possono essere risanati con delle **pietre sostitutive**. Ciò rappresenta comunque una procedura molto costosa. Per questo motivo solitamente si procede ad una **sostituzione con calcestruzzo**. Un'alternativa ritenuta buona per la sostituzione di settori danneggiati delle murature di gallerie, si è dimostrata la **riparazione con calcestruzzo a proiezione** in particolare dove è necessario risanare delle superfici più estese di intradossi [4.30]. La muratura danneggiata deve essere scalpellata fino alla parte interna sana, la malta per giunti tolta e le eventuali fessure esistenti devono essere allargate. Le superfici scoperte devono essere pulite e granulate con sabbatura, getto d'acqua e pressione d'aria.

Le superfici di riporto devono essere umide affinché possa essere garantita una buona adesività e per non sottrarre troppa acqua al calcestruzzo fresco nella fase di presa. A secondo degli influssi futuri prevedibili e delle condizioni locali possono essere scelti sia lo spessore che l'armatura (figura 7.15).

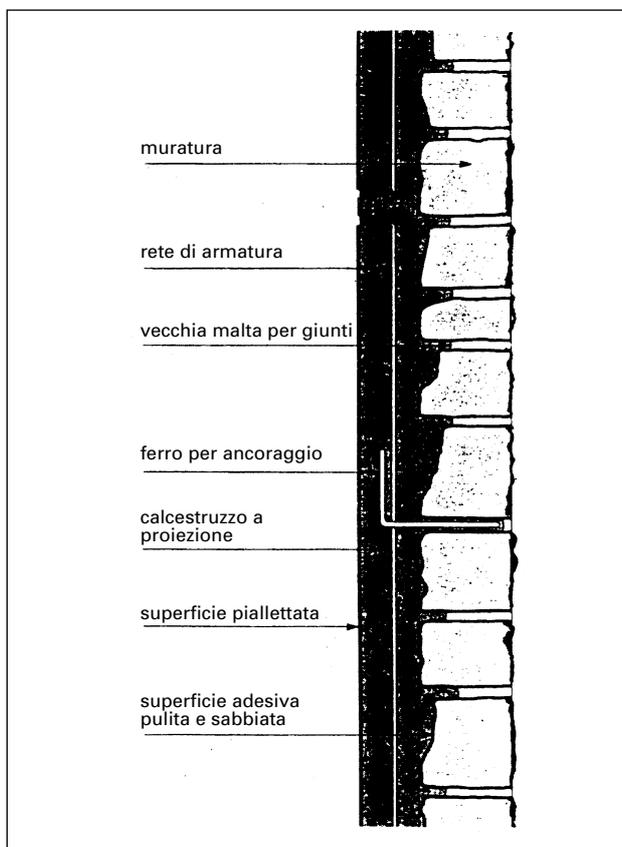


Figura 7.15 Nuovo strato di calcestruzzo ad iniezione su una muratura in pietra naturale [4.30].

Nei punti [7.16] e [7.17] si trovano preziose indicazioni sulla progettazione e l'esecuzione di provvedimenti di manutenzione molto impegnativi dal punto di vista tecnologico ed organizzativo nelle gallerie aperte al traffico.

Nel caso in cui le **murature** sono permanentemente **umide** si deve tentare di raccogliere e deviare l'acqua. Per le **costruzioni d'appoggio in pietra naturale** si raggiunge normalmente l'obiettivo soltanto con la messa in luce delle par-

ti interrate e relativa posa di condotte di drenaggio e successivo riempimento in calcestruzzo (figura 7.16). Molto spesso si tenta, senza successo, di risolvere il problema della presenza costante di umidità attraverso iniezioni dietro il muro o mediante l'applicazione di uno strato protettivo sul lato a valle. In quest'ultimo caso «lo strato di impermeabilizzazione» si stacca in poco tempo.

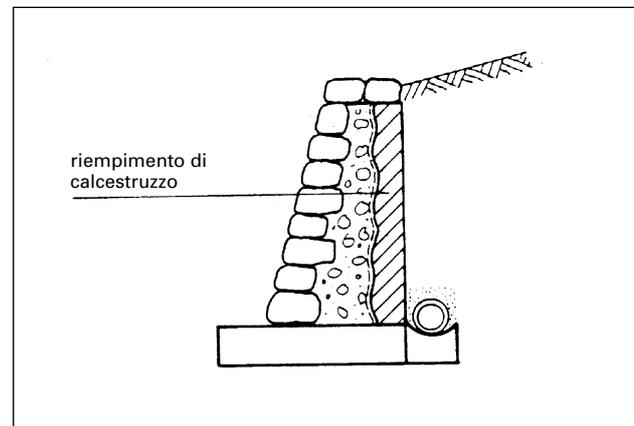


Figura 7.16 Risanamento di una muratura permanentemente intrisa d'acqua con la messa in luce, la posa di condotte di drenaggio ed il riempimento con calcestruzzo.

La conservazione di costruzioni in pietra naturale degni di tutela è diventata d'attualità nell'ambiente degli specialisti di restauro dei monumenti storici a partire dagli anni 70 [7.18]. In quel periodo il mestiere dello spaccapietre, precedentemente molto fiorente in molte regioni, era quasi completamente sparito. In un primo momento vennero quindi sviluppati metodi e prodotti poco orientati verso le esigenze tipiche di costruzione in pietra naturale a causa di un'eccessiva influenza della moda del risanamento di calcestruzzo con una vasta gamma di prodotti chimici.

In base alle prime esperienze ed anche per le conseguenze causate da riparazioni non appropriate, **in data 14 novembre 1986, l'associazione svizzera per la tutela dei monumenti, ha approvata la seguente risoluzione in merito alla problematica «trattamento delle pietre danneggiate»:**

«L'associazione per la tutela dei monumenti è molto preoccupata nel constatare la rapida progressione dei danni ai materiali da costruzione esposti all'atmosfera esterna.

Particolarmente colpiti sono le pietre naturali e segnatamente le arenarie utilizzate per lo più negli edifici storici. I risultati delle analisi eseguite ed in corso confermano la connessione causale della disgregazione della pietra e l'inquinamento dell'aria. I provvedimenti di restauro che si impongono e che sono quantitativamente accresciuti con l'impiego di notevoli mezzi finanziari, non possono trascurare il fatto che le opere dei nostri avi corrono sempre più il pericolo di essere tramandate soltanto come copia. L'associazione per la tutela dei monumenti richiama insistentemente l'attenzione sul fatto che i nostri monumenti possono essere protetti efficacemente soltanto se le sostanze nocive nell'aria saranno rapidamente e drasticamente ridotte.

L'associazione per la tutela dei monumenti si è occupata, anche in base alla vasta esperienza fatta nella prassi giornaliera, dei provvedimenti che devono essere eseguiti sulle pietre danneggiate qui e subito. La stessa ricorda che, da un lato, ogni monumento è un «unicum» e dall'altro, che la valenza originale può essere assegnata soltanto ad un'opera storica tramandata. L'opera originale nel suo assieme e la forma originale nei dettagli comprese le tracce della lavorazione, costituiscono il monumento del quale fanno parte anche i segni del tempo. L'obiettivo primario di ogni provvedimento di cura è rappresentato dalla conservazione e dalla garanzia del mantenimento «dell'originale» storico tramandato.

Per questo motivo l'associazione svizzera per la tutela dei monumenti ribadisce che, in tutti i posti dove è possibile, le pietre delle opere storiche devono essere conservate nella loro sostanza originale. Grande importanza viene attribuita alla manutenzione generale dell'edificio quale protezione preventiva dell'opera prima che si verificano dei danni. Anche per le pietre già danneggiate l'imperativo è quello della conservazione del pezzo originale. L'obiettivo primario del restauro consiste nel rallentare un'ulteriore degrado e non nel ripristino di una superficie «bella» quasi nuova. La dimensione degli interventi deve essere limitata il più possibile; per i provvedimenti a carico delle future generazioni deve essere salvaguardato un ampio spazio di manovra (interventi minimi, reversibilità massima).

Nei confronti dei materiali per la conservazione e per la sostituzione devono essere poste esigenze molto alte in relazione a conoscenze precise sulla composizione, sulla compatibilità con il concio, sulla lavorabilità e sull'esperienza di lungo termine. Si rende attenti, in modo esplicito, sull'uso di

rimedi prodigiosi poco sperimentati. Questi compiti dovrebbero essere assegnati soltanto agli artigiani molto esperti. Per il trattamento di costruzioni storiche in pietra sono necessarie delle conoscenze che superano nettamente quelle tramandate nelle professioni di artigiano, spacca-pietre e scultore. L'Associazione svizzera per la tutela dei monumenti esige quindi l'istituzione di possibilità di perfezionamento professionale per il restauro di pietre attualmente inesistenti nel nostro paese».

**Nella riparazione di costruzioni in pietra naturale con caratteristiche monumentali** delle quali fanno parte, oltre a facciate di edifici, anche ponti e costruzioni di appoggio, si deve procedere prudentemente.

Indicazioni importanti sono contenute nel punto [7.18]. Le stesse sono riferite primariamente alle costruzioni in arenaria della città di Berna ma sono utilizzabili in buona misura anche per altre pietre naturali.

L'autore pone l'accento sul fatto che le raccomandazioni illustrate non devono essere prese come ricette. Determinante resta pur sempre lo stato effettivo della costruzione al momento della valutazione.

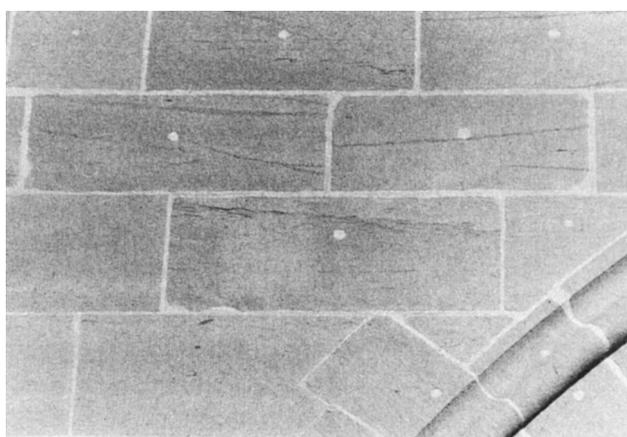


Figura 7.17 Mentre la facciata con i nuovi giunti, liberata fino al «fondo sano», ha un aspetto rigido e lavorata a macchina (sembra nuovo), (figura sopra) nella parte semplicemente pulita e, a secondo della necessità, con una stuccatura dei giunti, sono ben visibili le tracce della lavorazione e dell'invecchiamento (figura in calce) [7.18].

In dettaglio sono possibili **le seguenti fasi di interventi:**

#### **Pulizia**

Una pulizia accurata e prudente deve essere effettuata da uno specialista in pietre naturali prima della definitiva determinazione dei provvedimenti. Spesso è possibile raggiungere buoni risultati con una pulitura a secco per mezzo di spazzole morbide ed aspirapolveri oppure con una irrorazione costante con acqua potabile (istallazione fissa, senza acqua in pressione, additivi chimici, ed esclu-

dendo spazzole dure o altri mezzi meccanici, con particolare precauzione in corrispondenza dei giunti aperti e negli infissi delle finestre).

In casi eccezionali (ma solo previo accordo col responsabile della tutela dei monumenti) può essere utilizzato un apparecchio per la microsabbatura o al vapore.

#### **Riparazione dei giunti**

Soltanto i giunti allentati o rotti devono essere sostituiti. Nella rimozione del materiale per giunti la larghezza degli stessi non deve essere ampliata. Il nuovo materiale per giunti deve essere più molle del materiale in pietra – solitamente malta di calce – e deve corrispondere sia per colore che dimensione alla granulazione della malta utilizzata al momento della costruzione (presentazione di campioni). Giunti intatti o con incrinatura capillare – anche se il materiale non dovesse rispondere alle esigenze citate – non devono essere toccati.

#### **Conservazione**

Le pietre squadrate che presentano delle alterazioni superficiali, dovute ad agenti atmosferici, possono essere migliorate con provvedimenti idonei in modo tale che il loro degrado è fortemente rallentato. Questi provvedimenti non devono mai essere applicati in modo generico; gli stessi presuppongono una precisa conoscenza dello stato della pietra (se del caso tramite analisi di laboratorio). In alcuni casi, ma non sempre, si sono dimostrati efficaci gli incrudimenti (ma non sempre) comunque solo se realizzati da un artigiano molto esperto (si utilizza soprattutto estere silicico); l'idrofobizzazione deve essere fatta in modo leggero e soltanto in condizioni particolari.

#### **Lavorazione complementare delle pietre**

Ogni lavorazione complementare di pietre squadrate presuppone una perdita di sostanza e l'eliminazione delle tracce di lavorazione e dell'età. Una simile perdita non si giustifica nè per il fondo della facciata nè per gli elementi di articolazione come cornicioni, infissi di finestre ecc.. Se eccezionalmente devono essere fatti dei rifacimenti (ad esempio per lavori precedenti non eseguiti a regola d'arte, eventualmente nelle costruzioni della fine 19. e inizio 20. secolo) gli stessi devono essere preventivamente concordati con i responsabili della tutela dei monumenti e documentati con precisione.

In ogni caso questa lavorazione non deve avvenire in piano ma conforme alla superficie della pie-

tra squadrata; la precedente lavorazione deve essere ripresa esattamente sia nell'aspetto che nella fattura.

### **Riparazione con malta**

Piccoli danni possono essere eliminati con una malta idonea. Secondo esperienze fatte a tutt'oggi si ritengono adatte soprattutto le malte puramente minerali a base di calce - trass - cemento (possibilmente con una minima parte di cemento povero di sali); i lavori di riparazione con la malta dovrebbero essere terminati al momento in cui le temperature notturne non siano inferiori a 2°C durante 4 settimane dopo l'esecuzione.

Varie malte in commercio a base di materiali sintetici presentano dei problemi (stabilità del volume, adesività, resistenza del colore, reversibilità, ecc.). Per le malte di riparazione deve essere documentata l'esatta composizione (specificazione del materiale) ed oggetto di riferimento (dimostrazione della qualifica di successo da parte dei produttori).

I rivestimenti o le coperture in materiali combinati con prodotti sintetici non devono essere scambiati con le riparazioni in malta menzionate; gli stessi devono in ogni caso essere rifiutati perché sono in contrasto con gli obiettivi inerenti i provvedimenti sulla pietra.

### **Sostituzione delle pietre squadrate**

Per danni importanti che non permettono una riparazione con malta ad es. su elementi costruttivi molto esposti alle intemperie come i davanzali o le fasce, è indispensabile una sostituzione con conci o quadrati. Il materiale sostitutivo dovrebbe corrispondere alla pietra circostante (pietra naturale adeguata nella struttura e nel colore). Le pietre artificiali attualmente ottenibili - materiali di sostituzione combinati con cemento o resina sintetica - non soddisfano a lungo termine né dal punto di vista tecnologico (salatura, stabilità del volume) né da quello estetico (dimensione della grana, resistenza del colore all'usura). I pezzi sostitutivi in pietra naturale devono essere squadrate esattamente in modo da adeguarsi alla sagomatura esistente. Lo spessore dei pezzi sostitutivi deve essere di almeno 12 cm; in caso nella sostituzione delle piastre del davanzale questa misura può essere inferiore. Un'attenzione particolare deve essere rivolta all'adeguatezza dei giunti collocati tra la parte centrale del muro ed i pezzi nuovi. La malta per iniezione e per riempimento deve essere combinata con della calce (capacità di diffusione dell'acqua; malta più molle del-

la pietra); l'utilizzo del cemento deve essere evitato a causa della sua durezza ed i sali ivi contenuti.

### **Lavori plastico-costruttivi**

L'esigenza di conservare il più possibile la sostanza trova applicazione in particolare nei lavori scultorei. Se si è in presenza di uno stato di conservazione incerto possono essere eseguiti, come lavoro preparatorio per la pulizia, il rinforzo e la sostituzione con malta, dei calchi di garanzia in gesso. Questi calchi possono essere depositati presso l'Associazione per la tutela dei monumenti. Le copie dei lavori plastico-costruttivi sono giustificabili soltanto in casi di forza maggiore.

### **Protezione meccanica**

In casi particolari la copertura di elementi costruttivi particolarmente esposti agli agenti atmosferici può avere effetti positivi.

Le rispettive soluzioni devono essere concordati con i responsabili dell'Associazione per la tutela dei monumenti.



## **8. Bibliografia**

## 8. Bibliografia

### Capitolo 1: Introduzione

- [1.1] PI Edil: manutenzione delle strade in esercizio a traffico intenso No. 724.452,1991
- [1.2] PI Edil: tecniche di indagine nelle costruzioni di sottostruttura e del genio civile No. 724.453,1991
- [1.3] Wolff A: tecnologia per la conservazione della sostanza costruttiva del duomo di Colonia, costruzione di opere di infrastruttura, civili e strade 6/83, p. 356-364
- [1.4] documentazione SIA D 031: ancoraggi e straghi; 1989
- [1.5] documentazione SIA D 055: la sicurezza e la durevolezza di sistemi di fissaggio, 1990

### Capitolo 2: condizioni di base

- [2.1] Raccomandazione SIA 196, edizione 1987, conservazione di opere civili
- [2.2] Norma SIA 160, edizione 1989, influssi sulle strutture portanti
- [2.3] Norma SIA 162, edizione 1987, costruzioni in calcestruzzo
- [2.4] Norma SIA 162/1, edizione 1987, costruzioni in calcestruzzo - analisi dei materiali
- [2.5] Norma SIA 161/1, edizione 1990, costruzioni in acciaio
- [2.6] Norma SIA 161/1, edizione 1990, costruzioni in acciaio - garanzia di qualità ecc.
- [2.7] Documentazione SIA D 041: introduzione nella norma SIA 160 «influssi sulle strutture portanti»
- [2.8] Documentazione SIA D 041: introduzione nella norma SIA 162 e 161/1 «costruzioni in calcestruzzo, 1989
- [2.9] Documentazione SIA D 069: introduzione nelle nuove norme SIA 161 e 161/1 «costruzioni in acciaio», 1991
- [2.10] Documentazione SIA D 072: il ruolo dell'architetto relativo alle nuove norme sulle strutture portanti, 1991
- [2.11] Weber H: conservazione della pietra in Germania, protezione e risanamento di costruzioni 1/1987, p. 6-8
- [2.12] Arnold A: gli influssi causati dalle sostanze nocive nell'aria sui beni culturali, conferenza in occasione della giornata informativa della SVA del 14./15.5.1984 a Zurigo
- [2.13] Triptet I., Wiederkehr P.: studio sul problema delle piogge acide in Svizzera, disertazione EPFL, marzo 1983
- [2.14] BUWAL: la situazione ambientale in Svizzera, rapporto sull'ambiente 1990, EDMZ, 3000 Berna, No. ord. 319.402 i
- [2.15] Meyer H.G.: garanzia di qualità - un nuovo compito nell'edilizia. Tecnica di costruzione, fascicolo 7, luglio 1986, p. 217-223
- [2.16] Documentazione SIA D 062: garanzia di qualità nell'edilizia - un'esigenza del nostro tempo, 1990
- [2.17] Rechsteiner P.: direttive sui prodotti di costruzione, relazione in occasione del SBG Workshops «il commercio nazionale CE e la sua imprenditoria», 16./17. e 28/29 gennaio 1990

### **Capitolo 3: esigenze poste ai sistemi di protezione e principi di scelta**

- [3.1] Gruppo di lavoro «gallerie»: danni nei giunti, Schweizer Ingenieur und Architekt, 19/91, p. 426-428
- [3.2] Darwin D., Mannig D.G., Hognestad E. et al: Debate: Crack width, cover and corrosion, Concrete International, maggio 1985, p. 20-35
- [3.3] Käser M., Menn Ch.: durevolezza di strutture portanti in cemento armato; ripercussioni della formazione di fessure, Istituto per la statica e la costruzione ETH Zurigo, aprile 1988, rapporto No. 160

### **Capitolo 4: costruzioni in cemento**

- [4.1] Menn C.: ponti in cemento armato, casa editrice Springer, Vienna, New York, 1986
- [4.2] Keller T.: durevolezza di strutture portanti in cemento armato - meccanismi di trasporto - ripercussioni di fessure, Istituto per la statica e la costruzione, rapporto No. 184 ETH Zurigo, dicembre 1991
- [4.3] Documentazione SIA D 068, calcestruzzo ad alto rendimento (BHP), 1991
- [4.4] Martinola M.: utilizzo del calcestruzzo ad alto rendimento con microsilice nei ponti e nelle sovrastrutture, seminario a Costanza, 1991
- [4.5] Schiessl P.: influssi delle fessure sulla durevolezza di elementi costruttivi in cemento armato e calcestruzzo precompresso, DAf Stb, opuscolo 255, Berlino, 1986
- [4.6] Böhni H.: corrosione e protezione contro la corrosione dell'acciaio nel calcestruzzo, documentazione SIA D 020, 1988
- [4.7] Jungwirth D. e a.: costruzioni in calcestruzzo durevoli, edizione calcestruzzo, Düsseldorf, 1986
- [4.8] Bonzel J., Hilsdorf H.K.: calcestruzzo, calendario del calcestruzzo 1990, edizione Ernst & Sohn, Berlino
- [4.9] Elsener B.: metodi elettrochimici per il controllo delle costruzioni, documentazione SIA D 020, 1988
- [4.10] Peter G. e a.: l'importanza del calcestruzzo per la protezione contro la corrosione, documentazione SIA D 020, 1988
- [4.11] Comitato germanico per il cemento armato: direttive per la protezione e la riparazione di elementi costruttivi in calcestruzzo, parte 1a e 2a, agosto 1990, edizione Beuth, Berlino e Colonia
- [4.12] Böhni H. e a.: protezione e risanamento di costruzioni in cemento armato nell'ambito di strade, rapporto di ricerca 212, Ufficio federale per la costruzione stradale, incarico 9/83, marzo 1991
- [4.13] Menn C., e a.i: rilevamento e valutazione dei provvedimenti di rinforzo nei ponti in cemento armato (titolo di lavoro) incarico di ricerca No. 82/90 del ASB, pubblicato nel 1992
- [4.14] Raccomandazione SIA 16273, edizione 1990, determinazione della profondità di carbonatazione nel calcestruzzo

- [4.15] Jungwirth D.: procedimenti elettrochimici di protezione dal punto di vista pratico con particolare attenzione alla rialcalinizzazione, documento SIA D 065, 1990
- [4.16] Documentazione SIA D 065, procedimento elettrochimico di protezione per le costruzioni in cemento armato, 1990
- [4.17] Schmalz P.: riassunto e panoramica, documentazione SIA D 065, 1990
- [4.18] Ufficio federale delle costruzioni stradali: direttive sull'applicazione di tondini per cemento armato rivestiti in resina epossidica, Berna 1991
- [4.19] PI Edil: tecniche di controllo nelle costruzioni di opere di infrastrutture e civili No. 724.453 i 1991
- [4.20] Hunkeler F.: ispezione delle costruzioni mediante misurazione di potenziale, Schweizer Ingenieur und Architekt , 12/91 p. 272-278
- [4.21] Raccomandazione SIA 162/2, edizione 1990, determinazione del contenuto di cloro nel calcestruzzo
- [4.22] Theiler F.P.: analisi chimiche, documentazione SIA D 020, 1988
- [4.23] Böhni H.: considerazioni di base sulla corrosione e sulla protezione elettrochimica contro la corrosione, documentazione SIA D 065, 1990
- [4.24] Hunkeler F.: analisi sulla protezione catodica contro la corrosione sulla soletta della carreggiata nella galleria stradale S. Bernardino, documentazione SIA D 065, edizione 1990
- [4.25] Commissione per la corrosione: direttive per la progettazione, per l'esecuzione ed il controllo della protezione catodica contro la corrosione di costruzioni in cemento armato, C7d, edizione 1991
- [4.26] Bollettino SIA 2002, edizione ottobre 1990, ispezione e riparazione di elementi costruttivi in calcestruzzo
- [4.27] Kruse M.: influsso delle vibrazioni causate dal traffico sulla qualità del calcestruzzo ad iniezione nei risanamenti dei ponti, progetto BETH 048/86, agosto 1987, Istituto per la progettazione ed i lavori di costruzione, ETH, Zurigo
- [4.28] SIA 198, coltivazione in sotterraneo, bozza della presa di posizione, dicembre 1990
- [4.29] DIN 18 551, calcestruzzo ad iniezione, fabbricazione e controllo della qualità, bozza marzo 1990, Berlino
- [4.30] Teichert P.: calcestruzzo ad iniezione, editore E. Laich SA, 6670 Avegno, 1991
- [4.31] Ammon C.: calcestruzzo ad iniezione e le sue caratteristiche, riutilizzazione della resa elastica e influsso del tempo di giacenza della miscela secca sulla qualità del calcestruzzo ad iniezione, progetto IBEZH 037/83, marzo 1984
- [4.32] Ammon C.: aderenza del calcestruzzo ad iniezione sulla roccia, sul calcestruzzo e sulle pietre della galleria, progetto IBETH 042/84, marzo 1985
- [4.33] Hodel N.: influsso delle basse temperature sulla qualità del calcestruzzo ad iniezione, progetto IBETH 046/85, marzo 1986

- [4.34] Comitato germanico per cemento armato: direttive per la protezione e la riparazione di elementi costruttivi, parte 3a: garanzia di qualità dei lavori di costruzione, febbraio 1991, edizione Beuth, Berlino e Colonia
- [4.35] Ministero per il traffico: norme e direttive tecniche supplementari per il riempimento di fessure in elementi costruttivi in calcestruzzo (ZTV-RISS 88) Bonn
- [4.36] Associazione tedesca di calcestruzzo E.V.: riparazione, raccordo e rinforzo di elementi costruttivi in calcestruzzo (SIVV - manuale del corso), marzo 1990, Wiesbaden
- [4.37] Raccomandazione SIA 271, edizione 1986, tetti piani con teli d'impermeabilizzazione bituminosi, teli d'impermeabilizzazione polimerici-bituminosi e teli d'impermeabilizzazione in materiale sintetico
- [4.38] Documentazione SIA 60, problemi costruttivi e fisico-costruttivi nei tetti piani ed a forte pendenza, 1983
- [4.39] Documentazione SIA 79, Toitures-Architecture et construction, 2a edizione, 1986
- [4.40] Dournow R.: direttive di esecuzione per l'impermeabilizzazione di tetti piani, VERAS (Associazione svizzera delle imprese per le impermeabilizzazioni con mastice d'asfalto), edizione 1989
- [4.41] Raccomandazione SIA 272, edizione 1980, impermeabilizzazione contro le acque sotterranee
- [4.42] Norma SIA 280, edizione 1983, teli d'impermeabilizzazione in materiale sintetico (teli d'impermeabilizzazione polimerici)
- [4.43] Norma SIA 281, edizione 1983, teli d'impermeabilizzazione polimerici - bituminosi (TIPB)
- [4.44] Norme SNV 556 001 ... SNV 556 029 teli d'impermeabilizzazione bituminosi
- [4.45] Raccomandazione SIA V274, edizione 1987, impermeabilizzazione di giunti nelle costruzioni (interrogazione prolungata = pubblicazione provvisoria)
- [4.46] Ufficio federale per le costruzioni stradali, direttive per dettagli costruttivi di ponti, edizione 1990
- [4.47] Direttiva FFS, W Edil GD 36/89, condizioni di basi generali, sezioni trasversali normali e dettagli costruttivi per la progettazione di ponti in massiciata, 1989
- [4.48] Ruckstuhl F.: impermeabilizzazione di gallerie nella costruzione della rete di strade nazionali, Schweizer Ingenieur und Architekt, 50/87, p. 1448-1450
- [4.49] Klawa N., Haack A.: giunti nelle opere di infrastruttura, giunti e costruzioni di giunti nelle opere in calcestruzzo e cemento armato, Ernst + Sohn, Berlino, 1990
- [4.50] Tenucci J.: rinnovamenti e miglioramenti termo-tecnici di tetti piani [4.26], p. 39-49
- [4.51] Ragonesi M.: rinnovamento della copertura piana del tetto, Schweizer Ingenieur und Architekt, 36/89, p. 934-941
- [4.53] Blumer M.: risanamento di impermeabilizzazione e coperture di ponti, edizione speciale del convegno di specialisti della ATAG costruzioni stradali SA, 1983, p. 18-55

- [4.54] Wruck R., Günther G.: analisi delle impermeabilizzazioni di carreggiate su ponti in calcestruzzo, opuscolo 510, 1987, ricerca costruzione stradale e tecnica del traffico stradale, Bonn-Bad Godesberg
- [4.55] Ufficio d'ingegneria cantonale Nidvaldo, raccordi delle impermeabilizzazioni di ponti con teli d'impermeabilizzazione polimerici-bituminosi; TIPB, rapporto intermedio, luglio 1989 (non pubblicato)
- [4.56] Zwicky P.: impermeabilizzazione di costruzioni civili, Schweizer Ingenieur und Architekt, 1 6/89, p. 418-422
- [4.57] Vital J.D.: il tetto piano, dal punto di vista dell'esperto delle PTT, documentazione sulla seduta ERFA 1990
- [4.58] PI Edil, tecniche di controllo nelle costruzioni di opere di infrastruttura e civili, No. 724.453 i 1991 EDMZ, Berna
- [4.59] Jenni J.-P.: livello della tecnica nel rilevamento in piano della condizione costruttiva di gallerie, VSS, incarico di ricerca 59/88, 1990
- [4.60] Ministero Austriaco per le questioni economiche, ricerca stradale, ricerca e risanamento di fughe nelle impermeabilizzazioni dei ponti, opuscolo 395, Vienna 1991
- [4.61] Haack A., Emig K.- F.: impermeabilizzazione del tetto di parcheggi con materiali bituminosi, bitume 4/89, P. 162-171
- [4.62] Lohmeyer G., vasche bianche - semplici e sicure, edizione calcestruzzo, Düsseldorf, 1991
- [4.63] DBV bollettino, corpo costruttivo a tenuta stagna in calcestruzzo, Associazione germanica e.v., calcestruzzo, agosto 1989
- [4.64] Grube H.: costruzioni a tenuta stagna in calcestruzzo, edizione Otto Elsner, Darmstadt, 1982

### **Capitolo 5: costruzione in acciaio**

- [5.1] Wittfoht H.: Building Bridges, edizione calcestruzzo, Düsseldorf, 1984
- [5.2] Documentazione SIA D 030, impiego di acciai «inossidabili» nel edilizia, 1988
- [5.3] Schmid E.V.: protezione contro gli agenti atmosferici e la corrosione, Curt R. edizione Vincentz, Hannover, 1983
- [5.4] Theiler F.P.: per una «pelle» sicura dell'acciaio, bollettino commerciale No. 50, 13.12.1990
- [5.5] Cassidy S.: Spanning the Gate - The Golden Gate Bridge, Squarebooks, Mill Valley, CA, 1986
- [5.6] SN 555 001, protezione della superficie di costruzioni in acciaio, B3, edizione 1990, Ufficio centrale per la costruzione in acciaio, Zurigo
- [5.7] von Baeckmann W.: agenda per la protezione catodica contro la corrosione, edizione Vulkan, Essen, 4a edizione, 1987
- [5.8] Commissione contro la corrosione: direttive per la progettazione, l'esecuzione ed il funzionamento della protezione catodica di tubazioni, C1, edizione 1987, Zurigo

- [5.9] Commissione per la corrosione: regola della progettazione tecnica, esecuzione e funzionamento della protezione catodica per serbatoi di deposito interrati in acciaio, C5, edizione 1989, Zurigo
- [5.10] Haas G. e a.: le sovrastrutture in acciaio dei ponti Farø, Danimarca, costruzioni in acciaio, opuscolo 12, dic. 1985, p. 353-363
- [5.11] Vejdirektoratet, DK: The Superstructure of the Farø Bridges, Part 1, Design of the Steel Superstructure, 1987
- [5.12] Fischer M., Wien B.: esperienze fatte con ponti in acciaio resistenti agli agenti atmosferici, costruzione in acciaio, 1988

### **Capitolo 6: costruzione in legno**

- [6.1] Meierhofer U.: corrosione metallica nel legno, Schweizer Ingenieur und Architekt, 24/90 p. 696-698
- [6.2] Theiler F.: comportamento corrosivo degli elementi meccanici di giunzione 18esimo corso di perfezionamento della comunità di lavoro per la ricerca nella costruzione civile in legno/ giunzioni ed elementi di giunzione, 1986
- [6.3] Rückert J.: comportamento corrosivo di metalli nei confronti del legno, seduta VDI «corrosione e protezione corrosiva di elementi metallici di costruzione e di installazione all'interno degli edifici», Mannheim, 1984
- [6.4] Norma SIA 164, edizione 1981, costruzione in legno
- [6.5] EMPA / Lignum: direttiva sulla protezione del legno nell'edilizia, 1983/84
- [6.6] Meierhofer U., Sell J.: manchevolezze e danni nelle travi in legno compensato serie di pubblicazioni «difetti di costruzione, eliminazione e prevenzione» Bd. 5, 1982 edizione per l'edilizia, Zurigo-Dietikon
- [6.7] Meierhofer U., Sell J., Strässler H.: relativo alla sollecitazione dovuta agli agenti atmosferici di elementi costruttivi portanti in legno, costruzioni civili in legno-ricerca e prassi, casa editrice Bruder Karlsruhe, 1982, p. 67-74
- [6.8] Sell J., Meierhofer U., Kropf F.: legno compensato per costruzioni interne ed esterne, raccomandazione e garanzia di funzionalità a lunga durata, documentazione svizzera sulle costruzioni i4 00200, 1989
- [6.9] Lignum: regolamento: marchio di qualità per legno impregnato a pressione, 1984
- [6.10] Corsi di perfezionamento SAH: rinnovamento del legno, 1985
- [6.11] EMPA / Lignum: direttiva sugli insetti che distruggono il legno e le misure per combattergli, 1986
- [6.12] EMPA / Lignum: direttiva sul vero fungo dei legnami e le misure per combatterlo, 1986
- [6.13] Lignum: documentazione legno, protezione del legno e trattamento della superficie, 1976

**Capitolo 7: muratura in pietra naturale**

- [7.1] Tang Huancheng: Ancient Chinese Bridges, Chinese Cultural Relics Publishing House, 1987
- [7.2] Sadler H.: ponti, libro tascabile bibliofilo, No. 498, comunicazione Harenberg, Dortmund, 1986
- [7.3] Leonhardt F.: estetica e strutturazione di ponti , edizione tedesca, 1984
- [7.4] Norma SIA 178, edizione 1980, muratura in pietra naturale
- [7.5] de Quervain F.: petrografia tecnica, edizione Birkhäuser, Basilea, 1967
- [7.6] de Quervain F.: le rocce svizzere utilizzabili, edizione commissionaria: Kümmerly + Frey, Berna, 1969 (attualmente in rielaborazione)
- [7.7] FFS, disposizioni particolari per l'esecuzione della muratura nei lavori di sottostruttura, 1924 (esaurito)
- [7.8] Arnold A. e a.: Sumpfkalk – Grubenkalk, ETH, Zurigo, Istituto per la tutela dei monumenti, bollettino No. 2, 1979
- [7.9] Arnold A.: le malte e la relativa fabbricazione, conferenza del seminario 11.11.88 a Bonn (non pubblicato)
- [7.10] Associazione dei capomastri, direttive per l'esecuzione di murature in pietra naturale secondo le disposizioni particolari delle FFS, senza data, attorno al 1930 (esaurito)
- [7.11] Schwarz H.: le cave in Svizzera ed i relativi materiali, dissertazione, Università di Zurigo, 1983
- [7.12] Krumbein W.E.: anamnesi dei danni biogeni sulle costruzioni, diagnosi e terapia nella protezione delle costruzioni e tutela dei monumenti, protezione e risanamento delle costruzioni, No. 1/87, p. 14-23, No. 3/87, p. 110-117
- [7.13] Bock E.: induttore biologico della corrosione di pietre naturali - elevato attacco con nitrificatori, protezione e risanamento delle costruzioni, No. 1/87, p. 24-27
- [7.14] Arnold A.: moderno materiale alcalino da costruzione ed i problemi collegati alla conservazione dei monumenti «conservazione delle pietre naturali», quaderno di lavoro 31, Ufficio nazionale bavarese per la tutela dei monumenti, Monaco, 1985
- [7.15] Amberg R.: procedura termografica per il rilevamento dello stato del rivestimento delle gallerie, edizione speciale del simposio «risanamento delle gallerie», 12./13. marzo, Monaco, 1987, p. 14-18
- [7.16] Edizione speciale della rivista galleria; simposio «risanamento delle gallerie», Monaco, 12./13.marzo 1987
- [7.17] Jolissaint P.: il risanamento di gallerie ferroviarie dal punto di vista delle particolarità e delle difficoltà, academia tecnica Esslingen, corso d'istruzione No. 7115/84 038 settembre 1984
- [7.18] Furrer B.: restauro delle arenarie, Schweizer Ingenieur und Architekt, 42/90 p. 1199-1204
- [7.19] Norma SIA 226, edizione 1976, muratura in pietra naturale, prestazione e fornitura
- [7.20] Norma SIA 246, edizione 1976, lavori di muratura in pietra naturale (rivestimenti, coperture, pezzi)

- [7.21] CEN, Draft Standard on natural stone blocks, TC 127, WG 1, TG 7, dicembre 1990
- [7.22] Meisel U. e a.: conservazione delle pietre naturali e restauro di elementi costruttivi esterni, edizione edilizia Wiesbaden, 1988
- [7.23] Snethlage R.: prova sulla durezza delle idrofobizzazioni di edifici in arenaria, protezione e risanamento di costruzioni, edizione speciale, 1988, p. 16-19, seminario di stato del ministro l'affinazione e la tecnologia «conservazione delle pietre naturali», 17.12.-18.12.1986, Mainz
- [7.24] Analisi sulla conservazione di pietre naturali, ISBN 3-8167-4053-7, 183 pagine, No. ord. 4, edizione IRB, Stoccarda
- [7.25] Restauro di ponti in pietre, ISBN 3-8167-4087-1, 101 pagine, No. ord. 38 edizione IRB, Stuttgart
- [7.26] Bernhard F. e a.: la pietra naturale nella tutela dei monumenti, ISBN 3-87188-140-6, 1012 pagine, opera sull'istruzione professionale dell'artigianato scalpellino e scultore e.v. Wiesbaden, 1991
- [7.27] Eckhardt P.: pietre naturali in Svizzera e nel resto del mondo - storia e livello dell'industria delle pietre naturali, bollettino Associazione svizzera della geologia ed ingegneria sul petrolio (101.54, No. 126, aprile 1988, p. 31-37)



## **9. Allegato**

---

<b>9.1</b>	<b>Elenco delle abbreviazioni</b>	<b>162</b>
<b>9.2</b>	<b>Documentazione illustrata</b>	<b>163</b>

---

## 9. Allegato

### 9.1 Elenco delle abbreviazioni

UCF:	Ufficio delle costruzioni federali, Berna
UFCS:	Ufficio federale per le costruzioni stradali, Berna
CEN:	Comitato Europeo per la Normalizzazione, Bruxelles
DAfStb:	Comitato tedesco per il cemento armato, Berlino
DIN:	Norma tedesca di unificazione e.V., Berlino
EMPA:	Istituto Svizzero Ricerche e Prove Materiali, Dübendorf
AE:	Aziende elettriche (abbreviazione generale)
ISO:	Organizzazione Internazionale Normalizzazione, Ginevra
Lignum:	Unione svizzera a favore del legno, Zurigo
SGK:	Associazione svizzera per la protezione contro la corrosione, Zurigo
SIA:	Società svizzera degli ingegneri e degli architetti
SVDB:	Società svizzera di controllo per i serbatoi a pressione, Zurigo
SNV:	Istituto di Normalizzazione svizzero
ATS:	Associazione tecnica svizzera
INSAI:	Istituto nazionale svizzero di assicurazione contro gli infortuni
VSS:	Unione dei professionisti svizzeri della strada

## 9.2 Documentazione illustrata

Per la maggior parte delle figure e tabelle utilizzate, la provenienza è indicata nella relativa leggenda. Per quelle non indicate vedi di seguito:

- Capitolo 3** – 3.9: Dipartimento costruzione del Canton Ticino, sezione strade, Bellinzona  
– 3.11, 312, 314: Ufficio cantonale grigionese per le opere di infrastruttura, manutenzione delle opere d'arte, Coira  
– 3.15: Ufficio Cantonale per le costruzioni Uri, Altorf  
– 3.18: MC-chimica della costruzione, Dietikon (documentazione della ditta)
- Capitolo 4** – 4.2: Iscrizione commemorativa del ponte Weinland, direzione delle costruzioni pubbliche del Cantone Zurigo, 1958  
– 4.47, 4.48: Ufficio cantonale d'ingegneria Nidvaldo, Stans  
– 4.49: Kilcher SA, Recherswil (documentazione della ditta)
- Capitolo 5** – 5.2 Furrer B. e a.: cavalcavie: ponti sull'Aare a Berna, edizione Benteli, 1984
- Capitolo 6** – Tutte le figure (eccezion fatta per la figura 6.1), EMPA, divisione legno, Dübendorf e Lignum, Zurigo
- Capitolo 7** – 7.4: Tutela per i monumenti della città di Berna  
– 7.8 fino a 7.13: Dr. A. Arnold, Istituto per la tutela dei monumenti, ETH Zurigo