Pietro Salomone

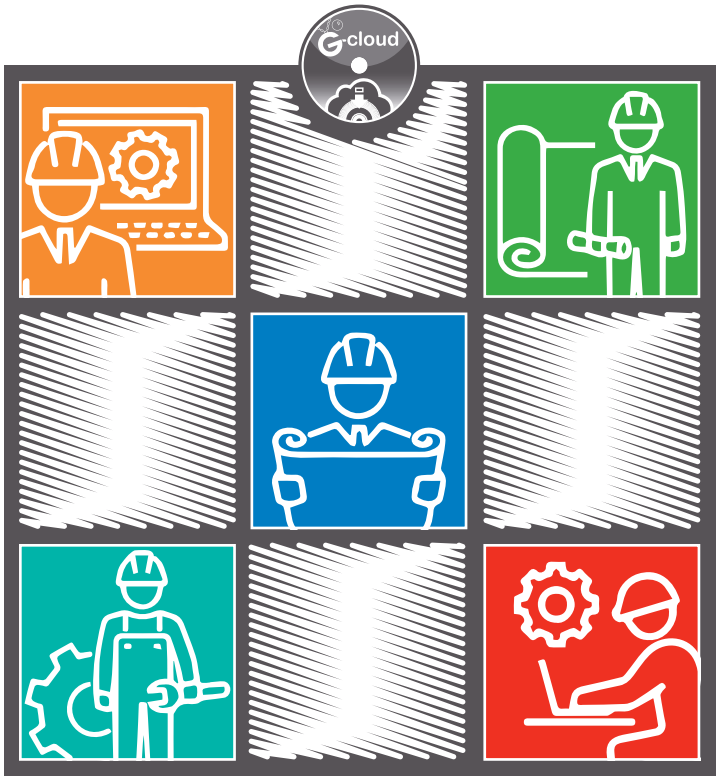
PROVE DIAGNOSTICHE SU EDIFICI ESISTENTI

INDICAZIONI OPERATIVE E CONTENUTI MINIMI PER L'ANALISI E LA DIAGNOSI DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE ALLA LUCE DELLE NTC 2018

SOFTWARE INCLUSO

FOGLI EXCEL PER I CONTROLLI CLS-ACCIAIO E LE PROVE SCLEROMETRICHE
CHECK LIST E MODELLI DI RIFERIMENTO

Glossario (termini più ricorrenti sull'argomento), **FAQ** (risposte alle domande più frequenti),
Test base / **Test avanzato** (verifiche sulla conoscenza dell'argomento)



GRAFILL

SOMMARIO

PREMESSA ..... p. 7

1. LE NTC 2018 ..... ″ 9
1.1. La valutazione della sicurezza nelle NTC 2018 ..... ″ 9
1.2. Classificazione degli interventi ..... ″ 10
1.2.1. Riparazione o intervento locale ..... ″ 11
1.2.2. Intervento di miglioramento ..... ″ 11
1.2.3. Intervento di adeguamento ..... ″ 12
1.3. Durabilità nelle NTC 2018 ..... ″ 12

2. DIAGNOSTICA E MANUTENZIONE ..... ″ 14
2.1. La diagnostica e la progettazione della manutenzione ..... ″ 14
2.2. Analisi geotecnica ..... ″ 14
2.3. Rilievi analisi fotogrammetrica ..... ″ 14
2.4. Rilievi e analisi umidità ..... ″ 14
2.4.1. Risalita capillare ..... ″ 15
2.4.2. Condensazione ..... ″ 15
2.4.3. Meteorica ..... ″ 15
2.5. Rilievo: analisi e studio quadro fessurativo ..... ″ 16
2.6. Analisi meccaniche e caratterizzazioni strutturali ..... ″ 16
2.7. Analisi magnetometrica ..... ″ 17
2.8. Analisi critico-architettonica sotto intonaci e/o rivestimenti ..... ″ 17
2.9. Intonaci: mappatura dei distacchi ..... ″ 18
2.10. Analisi diagnostiche su strutture lignee ..... ″ 18
2.11. Analisi diagnostiche su strutture ed elementi lapidei ..... ″ 19
2.12. Monitoraggi ..... ″ 19
2.13. Controlli non distruttivi convenzionali ..... ″ 19
2.14. Prove di laboratorio ..... ″ 20

3. IL CALCESTRUZZO ..... ″ 21
3.1. La nascita del calcestruzzo ..... ″ 21
3.2. Fattori che influenzano la resistenza del calcestruzzo ..... ″ 23
3.3. Il degrado del calcestruzzo ..... ″ 24
3.4. Durabilità del calcestruzzo ..... ″ 24
3.4.1. La carbonatazione ..... ″ 25
3.5. Le indagini diagnostiche ..... ″ 26
3.6. La documentazione fotografica ..... ″ 28

3.7. Il metodo dei carotaggi ... p. 28
3.7.1. Indebolimento delle strutture in conseguenza delle operazioni di carotaggio ... ″ 29
3.7.2. Microcarotaggio ... ″ 29
3.8. Prova sclerometrica ... ″ 30
3.9. La prova ultrasonica ... ″ 32
3.10. Prova di resistenza alla penetrazione: sonda Windsor ... ″ 34
3.11. Pull-out test ... ″ 34
3.12. Pull-out con inserti post-inseriti ... ″ 36
3.13. Pull-off test ... ″ 36
3.14. Il break-off test ... ″ 37
3.15. Metodi combinati ... ″ 37
3.16. Metodo SONREB ... ″ 38
3.17. Misura della profondità di carbonatazione ... ″ 38
3.18. Prova pacometrica ... ″ 39
3.19. Termografia ... ″ 40
3.19.1. Analisi termografica di edifici a struttura leggera ... ″ 41
3.20. Prove di carico ... ″ 42
3.20.1. Prove di carico e collaudi su ponti e viadotti ... ″ 43
3.20.2. Prove di carico speciali ... ″ 44
3.20.3. Applicazione delle sollecitazioni ... ″ 45
3.20.4. Misura delle frecce ... ″ 46
3.20.5. Misura della forza ... ″ 46
3.21. Monitoraggio delle lesioni e fessurazioni ... ″ 47
3.21.1. Trasduttori a variazione di induttanza o di mutua induttanza ... ″ 49
3.21.2. Trasduttori resistivi (potenziometri) ... ″ 49
3.21.3. Deformometri ... ″ 49
3.21.4. Inclinometri ... ″ 50
3.21.5. Fessurimetri ... ″ 50
3.21.6. Estensimetri ... ″ 50
3.21.7. Accelerometri ... ″ 52
3.21.8. Accelerometri piezometrici ... ″ 52
3.21.9. Accelerometro capacitivo ... ″ 53
3.21.10. Sismometri ... ″ 53
3.22. Magnetometria ... ″ 53
3.23. Gammagrafia ... ″ 53
3.24. Prove chimiche ... ″ 54
3.25. Prove chimico-fisiche ... ″ 54
3.26. Prove fisiche ... ″ 54

4. LA MURATURA ... ″ 56
4.1. La muratura portante ... ″ 56
4.2. Le malte ... ″ 57
4.3. Indagini non distruttive ... ″ 58
4.3.1. Prove soniche ... ″ 58
4.3.2. Caratterizzazione della malta ... ″ 60
4.3.3. Prove penetrometriche ... ″ 61

4.3.4. Martinetti piatti ... p. 62
4.3.4.1. La prova con martinetto piatto singolo ... ″ 62
4.3.4.2. La prova con martinetto piatto doppio ... ″ 62
4.3.4.3. Caratteristiche tecniche ... ″ 63
4.3.4.4. Attrezzatura per il taglio ... ″ 63
4.3.4.5. Misure delle deformazioni ... ″ 63
4.3.4.6. Pompa idraulica manuale ... ″ 64
4.3.4.7. Esecuzione di martinetto piatto singolo ... ″ 64
4.3.4.8. Esecuzione di martinetto piatto doppio ... ″ 65
4.3.5. Carotaggi della muratura ... ″ 66
4.3.6. Endoscopia ... ″ 67
4.3.7. Indagini radar ... ″ 67
4.3.8. Taglio diretto in sito (Shave Test) ... ″ 69
4.3.8.1. Prova secondo il metodo A ... ″ 69
4.3.8.2. Prova secondo il metodo B ... ″ 70
4.3.9. Prova indiretta di pull-out su malta ... ″ 72
4.3.10. Caratterizzazione chimico-fisica della muratura ... ″ 73

5. L'ACCIAIO ... ″ 76
5.1. L'utilizzo nelle costruzioni ... ″ 76
5.1.1. Acciai per calcestruzzo armato ... ″ 76
5.1.2. Acciai per calcestruzzo armato precompresso ... ″ 76
5.1.3. Acciai per strutture metalliche ... ″ 77
5.2. Prova Vickers ... ″ 77
5.3. Liquidi penetranti ... ″ 78
5.4. Controllo ultrasonoro ... ″ 79
5.5. L'esame con particelle magnetiche ... ″ 81

6. IL LEGNO ... ″ 83
6.1. Indagini su strutture lignee ... ″ 83
6.2. Difetti ed alterazioni del legno ... ″ 84
6.3. Controlli non distruttivi ... ″ 87
6.3.1. Analisi resistografica ... ″ 87
6.3.2. Sistema ad ultrasuoni ... ″ 88
6.3.3. Metodo penetrometrico ... ″ 89
6.3.4. Metodo igrometrico ed audiometrico ... ″ 89
6.3.5. Endoscopia ... ″ 90

7. INDAGINI GEOTECNICHE ... ″ 93
7.1. Definizione del modello geotecnico ... ″ 93
7.2. Scavi ... ″ 96
7.3. Sondaggi geognostici ... ″ 96
7.4. Sondaggi a distruzione di nucleo ... ″ 97
7.5. Sondaggi a carotaggio continuo ... ″ 98
7.5.1. Cassette catalogatrici ... ″ 98
7.5.2. Profili stratigrafici ... ″ 99
7.6. Sismica in foro ... ″ 99

7.7. Prelievo campioni ... p. 100
7.8. Prove di laboratorio ... ″ 101
7.9. Prova SPT ... ″ 103
7.10. Indagini down hole (DH) ... ″ 105
7.11. Prove penetrometriche statiche (CPT) ... ″ 108
7.11.1. Prove penetrometriche dinamiche a cono (SCPT) ... ″ 110
7.11.2. Prove penetrometriche dinamiche leggere ... ″ 111
7.12. Prove scissometriche ... ″ 111
7.13. Prove pressiometriche ... ″ 112
7.14. Prove dilatometriche ... ″ 113
7.14.1. Prova Dilatometrica Sismica (SDMT) ... ″ 115
7.15. Indagini geofisiche (SASW – MASW) ... ″ 116
7.16. Indagini di sismica passiva ... ″ 119
7.17. Georadar ... ″ 122
7.18. Metodo ecometrico ... ″ 125
7.19. Metodo del cross-hole ... ″ 129
7.20. Metodo dell'ammettenza meccanica ... ″ 134

8. INDAGINI SUI PONTI ... ″ 139
8.1. I ponti ... ″ 139
8.2. Ponti stradali ... ″ 140
8.2.1. Metodologia di controllo ... ″ 141
8.3. Prove non distruttive ... ″ 142
8.3.1. Prove non distruttive sul calcestruzzo ... ″ 142
8.3.2. Prove non distruttive sull'acciaio d'armatura ... ″ 143
8.3.3. Prove non distruttive sulle murature ... ″ 143
8.3.4. Prove non distruttive sulla struttura ... ″ 143
8.4. Prove di carico statiche ... ″ 144
8.5. Prove di carico dinamiche ... ″ 144
8.6. Caratterizzazione dinamica ... ″ 145

CHECK LIST E MODELLI ... ″ 147

INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE INCLUSO ... ″ 195
– Note sul software incluso ... ″ 195
– Requisiti hardware e software ... ″ 196
– Download del software e richiesta della password di attivazione ... ″ 196
– Installazione ed attivazione del software ... ″ 196

BIBLIOGRAFIA ... ″ 198

PREMESSA

Il presente testo ha lo scopo di fornire indicazioni operative e definire dei contenuti minimi per l'analisi e diagnosi dei materiali da costruzione alla luce delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni aggiornate con il Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018. L'opera nasce con l'idea di fornire ai tecnici uno strumento per illustrare le diverse attività connesse all'indagine diagnostica di edifici.

Esistono diverse tecniche diagnostiche da applicare su edifici esistenti. Le tecniche non distruttive sono il complesso di indagini diagnostiche, esami, rilievi condotti impiegando metodi che non alterano il materiale, non ne richiedono la distruzione o tanto meno il prelievo di campioni. Mentre le tecniche non invasive sono il complesso di indagini diagnostiche, esami, rilievi condotti su piccoli campioni prelevati dal manufatto.

Lo studio del costruito può porsi obiettivi diversi e condurre ad altrettanti risultati quali favorire un progresso della conoscenza e portare ad un miglioramento della capacità di intervenire in modo corretto sul patrimonio costruito.

Attualmente il patrimonio si gestisce per lo più con misure di emergenza dopo essere giunti a condizioni di estremo degrado, condizione che si traduce spesso nella realizzazione di interventi irrispettosi del valore culturale del bene. È importante intervenire il più correttamente possibile alla luce delle attuali conoscenze sul patrimonio per valorizzarlo. A tal fine è necessario operare scelte non solo tecniche, impiantistiche, strutturali o architettoniche, ma anche di gestione e utilizzo delle strutture.

Le indagini diagnostiche sul costruito spesso vengono realizzate con l'obiettivo dell'intervento di conservazione dal punto di vista della riabilitazione strutturale cioè garantire la sicurezza, preservando oltre che il bene materiale anche il funzionamento strutturale.

Di fondamentale importanza infatti è il tema della messa in sicurezza anche sismica di manufatti esistenti mediante l'indagine delle caratteristiche dei materiali da costruzione. L'attività d'indagine prevede lo sviluppo delle conoscenze sulla qualità dei materiali e sul loro comportamento d'insieme attraverso prove sperimentali in situ ed in laboratorio di tipo sia indiretto (come ad esempio il metodo Sonreb, ovvero combinazione di indagini sclerometriche ed ultrasoniche) che diretto (prelievo di campioni di calcestruzzo da sottoporre a compressione), così da consentire l'acquisizione di dati necessari per una valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici e, conseguentemente, alla definizione dei criteri e delle strategie preventive per la riduzione del rischio sismico.

Con l'entrata in vigore delle NTC 2018, il professionista delle strutture ha ricevuto nuove indicazioni circa le procedure standard basate sulle metodologie sperimentali innovative per il controllo delle fasi costruttive e della verifica della affidabilità in esercizio delle strutture.

Le metodologie riportate nelle NTC 2018, fanno riferimento ai temi della verifica sul patrimonio edilizio esistente e sulle nuove costruzioni. I temi riguardano la conoscenza delle caratte-

ristiche dei materiali in maniera più razionale rispetto al passato e soprattutto il controllo di essi e dell'intera struttura tramite il monitoraggio strutturale. I metodi di osservazione per il controllo e il monitoraggio sia in fase costruttiva che in fase di esercizio, potranno essere riportati nel piano di manutenzione redatto in fase di progettazione.

Nelle costruzioni esistenti le situazioni concretamente riscontrabili sono le più diverse ed è quindi impossibile prevedere regole specifiche per tutti i casi. Di conseguenza, il modello per la valutazione della sicurezza dovrà essere definito e giustificato dal progettista (tramite indagine diagnostica con le diverse strumentazioni), caso per caso, in relazione al comportamento strutturale attendibile della costruzione, tenendo conto delle indicazioni generali di seguito esposte.

Generalmente, quando si trattano costruzioni esistenti, può essere difficile disporre dei disegni originali di progetto necessari a ricostruirne la storia progettuale e costruttiva. Per le costruzioni, e in particolare per gli edifici a valenza culturale, storico-architettonica, è talvolta possibile, attraverso una ricerca archivistica, raccogliere una documentazione sufficientemente completa sulla loro storia edificatoria per ricostruire ed interpretare le diverse fasi edilizie.

Fondamentale è il rilievo geometrico-strutturale dovrà essere riferito sia alla geometria complessiva dell'organismo che a quella degli elementi costruttivi, comprendendo i rapporti con le eventuali strutture in aderenza. Nel rilievo dovranno essere rappresentate le modificazioni intervenute nel tempo, come desunte dall'analisi storico-critica. Il rilievo deve individuare l'organismo resistente della costruzione, tenendo anche presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi.

Dovranno altresì essere rilevati i dissesti, in atto o stabilizzati, ponendo particolare attenzione all'individuazione dei quadri fessurativi e dei meccanismi di danno. Per conseguire un'adeguata conoscenza delle caratteristiche dei materiali e del loro degrado, ci si baserà su documentazione già disponibile, su verifiche visive in sito e su indagini sperimentali. Le indagini dovranno essere motivate, per tipo e quantità, dal loro effettivo uso nelle verifiche. Nel caso di beni culturali e nel recupero di centri storici, si dovrà considerare l'impatto in termini di conservazione del bene. I valori delle resistenze meccaniche dei materiali vengono valutati sulla base delle prove effettuate sulla struttura e prescindono dalle classi discretizzate previste nelle norme per le nuove costruzioni.

Sulla base degli approfondimenti effettuati nelle fasi conoscitive sopra riportate, saranno individuati i *livelli di conoscenza* dei diversi parametri coinvolti nel modello (geometria, dettagli costruttivi e materiali), e definiti i correlati fattori di confidenza, da utilizzare come ulteriori coefficienti parziali di sicurezza che tengono conto delle carenze nella conoscenza dei parametri del modello. Nelle costruzioni esistenti in muratura soggette ad azioni sismiche, particolarmente negli edifici, si possono manifestare meccanismi locali e meccanismi d'insieme. I meccanismi locali interessano singoli pannelli murari o più ampie porzioni della costruzione, e sono favoriti dall'assenza o scarsa efficacia dei collegamenti tra pareti e orizzontamenti e negli incroci murari. I meccanismi globali sono quelli che interessano l'intera costruzione e impegnano i pannelli murari prevalentemente nel loro piano (*indagine diagnostica con le diverse strumentazioni*). La sicurezza della costruzione deve essere valutata nei confronti di entrambi i tipi di meccanismo.

CAPITOLO 1

LE NTC 2018

1.1. La valutazione della sicurezza nelle NTC 2018

La valutazione della sicurezza di una struttura esistente è un procedimento quantitativo, volto a determinare l'entità delle azioni che la struttura è in grado di sostenere con il livello di sicurezza minimo richiesto dalla presente normativa. L'incremento del livello di sicurezza si persegue, essenzialmente, operando sulla concezione strutturale globale con interventi, anche locali.

La valutazione della sicurezza, argomentata con apposita relazione, deve permettere di stabilire se:

- l'uso della costruzione possa continuare senza interventi;
- l'uso debba essere modificato (declassamento, cambio di destinazione e/o imposizione di limitazioni e/o cautele nell'uso);
- sia necessario aumentare la sicurezza strutturale, mediante interventi.

La valutazione della sicurezza deve effettuarsi quando ricorra anche una sola delle seguenti situazioni:

- riduzione evidente della capacità resistente e/o deformativa della struttura o di alcune sue parti dovuta a: significativo degrado e decadimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali, deformazioni significative conseguenti anche a problemi in fondazione;
- danneggiamenti prodotti da azioni ambientali (sisma, vento, neve e temperatura), da azioni eccezionali (urti, incendi, esplosioni) o da situazioni di funzionamento ed uso anomali;
- provati gravi errori di progetto o di costruzione;
- cambio della destinazione d'uso della costruzione o di parti di essa, con variazione significativa dei carichi variabili e/o passaggio ad una classe d'uso superiore;
- esecuzione di interventi non dichiaratamente strutturali, qualora essi interagiscano, anche solo in parte, con elementi aventi funzione strutturale e, in modo consistente, ne riducano la capacità e/o ne modifichino la rigidezza;
- ogni qualvolta si eseguano gli interventi strutturali;
- opere realizzate in assenza o difformità dal titolo abitativo, ove necessario al momento della costruzione, o in difformità alle norme tecniche per le costruzioni vigenti al momento della costruzione.

Qualora le circostanze di cui ai punti precedenti riguardino porzioni limitate della costruzione, la valutazione della sicurezza potrà essere effettuata anche solo sugli elementi interessati e su quelli con essi interagenti, tenendo presente la loro funzione nel complesso strutturale, posto che le mutate condizioni locali non incidano sostanzialmente sul comportamento globale della struttura. Nella valutazione della sicurezza, da effettuarsi ogni qual volta si eseguano interventi strutturali di miglioramento o adeguamento, il progettista dovrà esplicitare in un'apposita relazione, esprimendoli in termini di rapporto fra capacità e domanda, i livelli di sicurezza precedenti all'intervento e quelli raggiunti con esso.

Qualora sia necessario effettuare la valutazione della sicurezza della costruzione, la verifica del sistema di fondazione è obbligatoria solo se sussistono condizioni che possano dare luogo a fenomeni di instabilità globale o se si verifica una delle seguenti condizioni:

- nella costruzione siano presenti importanti dissesti attribuibili a cedimenti delle fondazioni o dissesti della stessa natura si siano prodotti nel passato;
- siano possibili fenomeni di ribaltamento e/o scorrimento della costruzione per effetto: di condizioni morfologiche sfavorevoli, di modificazioni apportate al profilo del terreno in prossimità delle fondazioni, delle azioni sismiche di progetto;
- siano possibili fenomeni di liquefazione del terreno di fondazione dovuti alle azioni sismiche di progetto. Allo scopo di verificare la sussistenza delle predette condizioni, si farà riferimento alla documentazione disponibile e si potrà omettere di svolgere indagini specifiche solo qualora, a giudizio esplicitamente motivato del professionista incaricato, sul volume di terreno significativo e sulle fondazioni sussistano elementi di conoscenza sufficienti per effettuare le valutazioni precedenti.

La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle costruzioni esistenti potranno essere eseguite con riferimento ai soli SLU, salvo che per le costruzioni in classe d'uso IV, per le quali sono richieste anche le verifiche agli SLE; in quest'ultimo caso potranno essere adottati livelli prestazionali ridotti. Per la combinazione sismica le verifiche agli SLU possono essere eseguite rispetto alla condizione di salvaguardia della vita umana (SLV) o, in alternativa, alla condizione di collasso (SLC).

Nelle verifiche rispetto alle azioni sismiche il livello di sicurezza della costruzione è quantificato attraverso il rapporto tra l'azione sismica massima sopportabile dalla struttura e l'azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione; l'entità delle altre azioni contemporaneamente presenti è la stessa assunta per le nuove costruzioni, salvo quanto emerso riguardo ai carichi verticali permanenti a seguito delle indagini condotte e salvo l'eventuale adozione di appositi provvedimenti restrittivi dell'uso della costruzione e, conseguentemente, sui carichi verticali variabili. La restrizione dell'uso può mutare da porzione a porzione della costruzione e, per l'i-esima porzione, è quantificata attraverso il rapporto tra il valore massimo del sovraccarico variabile verticale sopportabile da quella parte della costruzione e il valore del sovraccarico verticale variabile che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione. È necessario adottare provvedimenti restrittivi dell'uso della costruzione e/o procedere ad interventi di miglioramento o adeguamento nel caso in cui non siano soddisfatte le verifiche relative alle azioni controllate dall'uomo, ossia prevalentemente ai carichi permanenti e alle altre azioni di servizio.

1.2. Classificazione degli interventi

Si individuano le seguenti categorie di intervento:

- *interventi di riparazione o locali*: interventi che interessino singoli elementi strutturali e che, comunque, non riducano le condizioni di sicurezza preesistenti;
- *interventi di miglioramento*: interventi atti ad aumentare la sicurezza strutturale preesistente, senza necessariamente raggiungere i livelli di sicurezza fissati al paragrafo 8.4.3 delle NTC 2018;
- *interventi di adeguamento*: interventi atti ad aumentare la sicurezza strutturale preesistente, conseguendo i livelli di sicurezza fissati al paragrafo 8.4.3 delle NTC 2018.

Solo gli interventi di miglioramento ed adeguamento sono sottoposti a collaudo statico. Per gli interventi di miglioramento e di adeguamento l'esclusione di provvedimenti in fondazione dovrà essere in tutti i casi motivata esplicitamente dal progettista, attraverso una verifica di idoneità del sistema di fondazione in base ai criteri indicati nel paragrafo 8.3 delle NTC 2018.

Qualora l'intervento preveda l'inserimento di nuovi elementi che richiedano apposite fondazioni, queste ultime dovranno essere verificate con i criteri generali di cui ai capitoli 6 e 7 delle NTC 2018, così come richiesto per le nuove costruzioni.

Per i beni di interesse culturale ricadenti in zone dichiarate a rischio sismico, ai sensi del comma 4, dell'art. 29 del decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 (*Codice dei beni culturali e del paesaggio*), è in ogni caso possibile limitarsi ad interventi di miglioramento effettuando la relativa valutazione della sicurezza.

Vediamo nello specifico i diversi tipi di intervento.

1.2.1. *Riparazione o intervento locale*

Gli interventi di questo tipo riguarderanno singole parti e/o elementi della struttura. Essi non debbono cambiare significativamente il comportamento globale della costruzione e sono volti a conseguire una o più delle seguenti finalità:

- ripristinare, rispetto alla configurazione precedente al danno, le caratteristiche iniziali di elementi o parti danneggiate;
- migliorare le caratteristiche di resistenza e/o di duttilità di elementi o parti, anche non danneggiati;
- impedire meccanismi di collasso locale;
- modificare un elemento o una porzione limitata della struttura.

Il progetto e la valutazione della sicurezza potranno essere riferiti alle sole parti e/o elementi interessati, documentando le carenze strutturali riscontrate e dimostrando che, rispetto alla configurazione precedente al danno, al degrado o alla variante, non vengano prodotte sostanziali modifiche al comportamento delle altre parti e della struttura nel suo insieme e che gli interventi non comportino una riduzione dei livelli di sicurezza preesistenti.

La relazione di cui al paragrafo 8.3 delle NTC 2018 che, in questi casi, potrà essere limitata alle sole parti interessate dall'intervento e a quelle con esse interagenti, dovrà documentare le carenze strutturali riscontrate, risolte e/o persistenti, ed indicare le eventuali conseguenti limitazioni all'uso della costruzione.

Nel caso di interventi di rafforzamento locale, volti a migliorare le caratteristiche meccaniche di elementi strutturali o a limitare la possibilità di meccanismi di collasso locale, è necessario valutare l'incremento del livello di sicurezza locale

1.2.2. *Intervento di miglioramento*

La valutazione della sicurezza e il progetto di intervento dovranno essere estesi a tutte le parti della struttura potenzialmente interessate da modifiche di comportamento, nonché alla struttura nel suo insieme. Per la combinazione sismica delle azioni, il valore di ζ_E può essere minore dell'unità. A meno di specifiche situazioni relative ai beni culturali, per le costruzioni di classe III ad uso scolastico e di classe IV il valore di ζ_E, a seguito degli interventi di miglioramento, deve essere comunque non minore di 0,6, mentre per le rimanenti costruzioni di classe III e per quelle di classe II il valore di ζ_E, sempre a seguito degli interventi di miglioramento, deve

essere incrementato di un valore comunque non minore di 0,1. Nel caso di interventi che prevedano l'impiego di sistemi di isolamento, per la verifica del sistema di isolamento, si deve avere almeno $\xi_E = 1{,}0$.

1.2.3. *Intervento di adeguamento*

L'intervento di adeguamento della costruzione è obbligatorio quando si intenda:

a) sopraelevare la costruzione;

b) ampliare la costruzione mediante opere ad essa strutturalmente connesse e tali da alterarne significativamente la risposta;

c) apportare variazioni di destinazione d'uso che comportino incrementi dei carichi globali verticali in fondazione superiori al 10%, valutati secondo la combinazione caratteristica di cui alla equazione 2.5.2 del paragrafo 2.5.3 delle NTC 2018, includendo i soli carichi gravitazionali. Resta comunque fermo l'obbligo di procedere alla verifica locale delle singole parti e/o elementi della struttura, anche se interessano porzioni limitate della costruzione;

d) effettuare interventi strutturali volti a trasformare la costruzione mediante un insieme sistematico di opere che portino ad un sistema strutturale diverso dal precedente; nel caso degli edifici, effettuare interventi strutturali che trasformano il sistema strutturale mediante l'impiego di nuovi elementi verticali portanti su cui grava almeno il 50% dei carichi gravitazionali complessivi riferiti ai singoli piani;

e) apportare modifiche di classe d'uso che conducano a costruzioni di classe III ad uso scolastico o di classe IV.

In ogni caso, il progetto dovrà essere riferito all'intera costruzione e dovrà riportare le verifiche dell'intera struttura post-intervento.

Nei casi *a)*, *b)* e *d)*, per la verifica della struttura, si deve avere $\xi_E \geq 1{,}0$.

Nei casi *c)* ed *e)* si può assumere $\xi_E \geq 0{,}80$. Resta comunque fermo l'obbligo di procedere alla verifica locale delle singole parti e/o elementi della struttura, anche se interessano porzioni limitate della costruzione.

Una variazione dell'altezza dell'edificio dovuta alla realizzazione di cordoli sommitali o a variazioni della copertura che non comportino incrementi di superficie abitabile, non è considerato ampliamento, ai sensi della condizione *a)*. In tal caso non è necessario procedere all'adeguamento, salvo che non ricorrano una o più delle condizioni di cui agli altri precedenti punti.

1.3. Durabilità nelle NTC 2018

Un adeguato livello di durabilità può essere garantito progettando la costruzione, e la specifica manutenzione, in modo tale che il degrado della struttura, che si dovesse verificare durante la sua vita nominale di progetto, non riduca le prestazioni della costruzione al di sotto del livello previsto. Tale requisito può essere soddisfatto attraverso l'adozione di appropriati provvedimenti stabiliti tenendo conto delle previste condizioni ambientali e di manutenzione ed in base alle peculiarità del singolo progetto, tra cui:

- scelta opportuna dei materiali;
- dimensionamento opportuno delle strutture;
- scelta opportuna dei dettagli costruttivi;

- adozione di tipologie costruttive e strutturali che consentano, ove possibile, l'ispezionabilità delle parti strutturali;
- pianificazione di misure di protezione e manutenzione; oppure, quando queste non siano previste o possibili, progettazione rivolta a garantire che il deterioramento della costruzione o dei materiali che la compongono non ne causi il collasso;
- impiego di prodotti e componenti chiaramente identificati in termini di caratteristiche meccanico-fisico-chimiche, indispensabili alla valutazione della sicurezza, e dotati di idonea qualificazione, così come specificato al Capitolo 11 delle NTC 2018;
- applicazione di sostanze o ricoprimenti protettivi dei materiali, soprattutto nei punti non più visibili o difficilmente ispezionabili ad opera completata;
- adozione di sistemi di controllo, passivi o attivi, adatti alle azioni e ai fenomeni ai quali l'opera può essere sottoposta. Le condizioni ambientali devono essere identificate in fase di progetto in modo da valutarne la rilevanza nei confronti della durabilità.

CAPITOLO 2

DIAGNOSTICA E MANUTENZIONE

2.1. La diagnostica e la progettazione della manutenzione

La situazione di crisi economica recentemente creatasi in molti dei paesi economicamente sviluppati, impone interventi di spesa pubblica e privata sempre meno onerosi e più trasparenti.

Ovviamente tale atteggiamento troverà immediata ripercussione anche nel settore edilizio dove i lavori di riconversione del patrimonio edilizio, recupero, restauro e manutenzione sono soggetti a troppe variabili che spesso fanno lievitare notevolmente il costo globale delle opere previste. A tale proposito è giusto far ricadere l'attenzione sull'importanza della diagnostica e della progettazione, intesa come prima vera e propria fase di intervento.

Anche se si manifesta nei diversi settori con caratteri distinti, la fase progettuale rappresenta il principale fattore che influenza direttamente le scelte operative e quindi, in ultima analisi, la spesa dell'intervento.

2.2. Analisi geotecnica

Comprende uno studio geologico della zona, una serie di perforazioni, prelievi di campioni indisturbati, prove penetrometriche, analisi geotecniche di laboratorio e la relazione geologica firmata da professionista. Il tutto per valutare quantitativamente le caratteristiche meccaniche del suolo su cui è appoggiato l'edificio da restaurare e/o consolidare.

In caso di problematiche come la presenza di un grave fenomeno fessurativo, è prevista l'installazione di piezometro e il monitoraggio delle variazioni di livello della falda acquifera.

2.3. Rilievi analisi fotogrammetrica

Include i rilievi eseguiti in forma tradizionale, mista e fotogrammetrici nelle loro numerose forme (fotopiano, con camera, ecc.).

Il rilievo, le tavole, le planimetrie sono la base su cui ubicare qualunque campagna di analisi diagnostiche.

2.4. Rilievi e analisi umidità

L'umidità presente sulle murature dei nostri edifici ha tre generatrici fondamentali:

- risalita capillare;
- condensazione;
- meteorica.

La mappatura del fenomeno e la quantificazione numerica delle bande di umidità sono importanti per definire il fenomeno e per progettare gli adeguati interventi di bonifica.

2.4.1. *Risalita capillare*

Per la giusta valutazione della risalita capillare, il modo di operare più corretto è quello di effettuare una serie di misure a diverse altezze e profondità su tutto il perimetro dell'edificio analizzato.

Le misure sono eseguite con diverse tecniche:

- analisi termografica all'infrarosso su tutte le pareti esterne e interne;
- misura delta resistenza tra due elettrodi introdotti nel muro (acqua boilprotimeter, ecc.) con lettura di dati includenti un lieve errore nelle zone in cui siano presenti concentrazioni saline;
- prelievo di carota e/o materiale e misura percentuale umidità col metodo ponderale, previo cottura in fornetto;
- prelievo di polvere di intonaco/pietra/mattone a misura umidità con strumenti di cantiere al carburo.

È molto importante valutare:

- la distribuzione dei livelli minimi, medi e massimi dell'umidità;
- la mappatura della presenza salina per le correzioni sui valori misurati col metodo elettrico;
- le varie concentrazioni saline evidenziate da un'accurata analisi di laboratorio.

In alcuni casi, quando la risalita altera in maniera vistosa le condizioni dei manufatti interni, è importante effettuare in parallelo un monitoraggio del movimento della falda acquifera tramite piezometrico.

2.4.2. *Condensazione*

Il processo della produzione di condensazione avviene in particolari condizioni termoigrometriche per cui, a causa di determinate condizioni climatiche, su una data superficie a bassa temperatura e particolare umidità dell'aria, si produce condensazione di vapore (punto di rugiada).

Il processo si ripete e continua alle stesse condizioni ambientali, fino alla totale saturazione del muro (imbibimento totale di acqua).

A quel punto l'acqua generata si diffonde sui pavimenti e sulle pareti in maniera diffusa e visibile, producendo danni alle strutture e alle persone che vi vivono.

Per rilevare le condizioni termoigrometriche di musei e locali impiegati alla conservazione di opere artistiche vengono utilizzati:

- analisi termografica all'infrarosso a diverse condizioni climatiche (rilievi stagionali);
- monitoraggio microclimatico con sonde temperatura/umidità in aria e a contatto con le superfici *sospette*;
- monitoraggio con anemometro per valutare le correnti d'aria indotte nel locale nelle varie condizioni climatiche.

2.4.3. *Meteorica*

Di solito viene localizzata con un'attenta analisi visiva dei prospetti esterni ed è imputabile o ad acqua piovana trasversale, che imbibisce le pareti, o a infiltrazioni e perdite delle coperture. Viene rilevata oltre il visibile, nel caso di intonaci pesanti, con dettagliata analisi all'infrarosso, certificata e mappata con termogrammi ed elaborati computerizzati a colori.

2.5. Rilievo: analisi e studio quadro fessurativo

Il lesionamento delle strutture è una patologia comune e presente in molti edifici, ed è generata nella maggior parte dei casi da:

- cedimento dei materiali e strutture per degrado nel tempo;
- cedimento fondazionale;
- cedimento per l'uso di carichi non previsti nella progettazione iniziale;
- cedimento generato da eventi sismici.

Un serio approccio di intervento prevede:

- dettagliata analisi visiva effettuata da tecnico esperto;
- rilievo fotografico delle anomalie;
- studio dei disegni e del plesso fessurativo in esso riportato.

In base ai risultati scaturiti dalla verifica dei dati di questi tre punti, ne deriva:

1) il quadro fessurativo è chiaro e l'ingegnere passa i dati certi agli addetti del consolidamento strutturale.
2) il quadro fessurativo è generato da cedimenti dei materiali e quindi viene programmata una serie di analisi diagnostiche e meccaniche sulle strutture e materiali, ecc..
3) il quadro fessurativo è generato da probabili cedimenti del terreno e quindi viene decisa una analisi geologica e geotecnica per valutare le caratteristiche meccaniche del terreno sottostante e delle fondazioni.
4) il quadro fessurativo presenta sintomi evolutivi e allora viene previsto un monitoraggio elettronico/strumentale dei cedimenti tramite trasduttori quali:
   - fessurimetri;
   - estensimetri;
   - inclinometri.

   Il periodo minimo di questo tipo di analisi varia tra 9 e 18 mesi per avere un quadro chiaro dei risultati che devono scaturire.
5) Il quadro fessurativo è incompleto, è probabile che molte lesioni siano presenti sotto intonaci e/o rivestimenti affrescati.

   Con questa ipotesi viene decisa una campagna di analisi diagnostiche quali:
   - termografie computerizzate all'infrarosso per evidenziare sotto i vari rivestimenti il reale quadro fessurativo;
   - rilievi endoscopici effettuati nella sezione muraria per verifiche interne alla struttura;
   - analisi soniche nelle zone sospette per individuare le lesioni e quantificare la loro profondità.

È dunque importante sottolineare come questa complessa analisi, troppo spesso effettuata in maniera empirica e troppo semplicistica, coinvolga tecnici ed esperti di varie discipline e le più sofisticate apparecchiature elettroniche.

2.6. Analisi meccaniche e caratterizzazioni strutturali

Questa sezione delta diagnostica ha il compito di fornire ai progettisti i dati tecnici e numerici, le caratteristiche meccaniche/sperimentali dei materiali e delle strutture, presenti nell'opera da restaurare.

Il quadro generale delle prove include:
- analisi di strutture con prove di carico effettuate con le tecniche più disparate (gravità, contrasto, trazione, ecc.) con rilievo strumentale dell'analisi, graficizzazione computerizzata del risultati, dati tecnici e verbale di prova firmato da ingegnere professionista;
- mappatura degli stati tensionali presenti in alcuni settori della struttura analizzata, eseguita con martinetti a cella semplice;
- valutazione delle caratteristiche meccaniche di strutture in site con misura della resistenza a compressione e modulo di elasticità tramite martinetti a cella doppia, rilievo dati, interpretazione e graficizzazione dei risultati;
- caratterizzazione meccanico-strutturale di elementi architettonici con analisi soniche-ultrasoniche-endoscopiche, identificazione con prove non distruttive, delle caratteristiche costruttive di muratura (piena, a sacco, con camera d'aria, ecc.) e delle caratteristiche meccaniche in base alle velocità soniche medie misurate;
- prelievo di concio (norme UNI) e prove di laboratorio ($\delta - E$);
- prelievo di carote e campioni per prove di laboratorio ($\delta - E$).

2.7. Analisi magnetometrica

Rilievi e controlli con apparecchiature magnetometriche della mappa degli elementi e/o strutture metalliche presenti e celate nell'edificio e/o opera d'arte da restaurare.

La lettura di tutti gli elementi metallici, il loro dimensionamento e la loro ubicazione, sono elementi fondamentali dell'analisi strutturale eseguita dal progettista, prima della programmazione del futuro *restauro*.

2.8. Analisi critico-architettonica sotto intonaci e/o rivestimenti

La progettazione del restauro di un qualunque edificio prevede, oltre all'analisi e alla caratterizzazione meccanica delle strutture, un'attenta analisi architettonica al fine di conservare tutte le caratteristiche storiche del manufatto.

Molto spesso però le modifiche, i rifacimenti, le variazioni architettoniche apportate nei secoli passati, sono nascoste e celate sotto diversi strati di intonaco o rivestimento affrescato.

Risulta pertanto determinante, prima di progettare l'intervento di ristrutturazione, eseguire un'attenta analisi e ricerca di tutti quegli elementi non visibili, ma sicuramente presenti nelle strutture quali:
- archi;
- architravi;
- monofore;
- bifore;
- camini occlusi e percorsi di canne fumarie;
- porte e finestre tamponate, modificate, occluse;
- elementi strutturali quali litoidi, lignei, metallici;
- modifiche strutturali;
- vecchie canalizzazioni in disuso;
- caratterizzazione dei materiali costruttivi e lord dimensionamento.

Tutte queste ricerche sono esplicate con controlli non distruttivi quali le analisi computerizzate all'infrarosso.

Tali analisi sfruttano le diverse caratteristiche termocinetiche dei materiali edili quali, sottoposti a cicli termici variabili, emettono una radiazione infrarossa contenente tutte le informazioni architettoniche sopra citate.

Alla fine di tutte queste analisi, riportati tutti i ritrovamenti e le caratterizzazioni architettoniche originali sui disegni, sarà più facile e proficuo per il restauratore progettare l'intervento più appropriate di recupero, nel rispetto degli elementi storici ritrovati.

2.9. Intonaci: mappatura dei distacchi

Un intervento preliminare di consolidamento e restauro di superfici affrescate è relativo all'analisi diagnostica che evidenzi, con controlli non distruttivi, la mappatura dei distacchi tra l'intonaco affrescato e il muro sottostante.

Questa prova a effettuata con analisi computerizzate all'infrarosso eseguite a distanza dalle superfici affrescate, previo un loro lieve riscaldamento, ottenuto con lampade all'IR, con generatore di aria calda o con l'irraggiamento solare.

Nella stessa propensione termografica possono essere rilevati:

- distacchi tra pellicola affrescata e intonachino sottostante;
- distacchi tra supporto affrescato o intonaco e muro sottostante;
- chiodature a reticolati metallici di supporto;
- elementi architettonici (archi architravi, ecc.);
- umidità meteorica, di condensa o di infiltrazione nascosta nell'intonaco.

Con la mappa in scala dei difetti rilevati, risulta più semplice seguire un preventivo tecnico/economico per restaurare l'opera e ottimizzare, nello stesso tempo, gli interventi di consolidamento finali.

2.10. Analisi diagnostiche su strutture lignee

Si tratta di un'analisi combinata per fornire al progettista lo stato di conservazione e le attuali caratteristiche meccaniche di strutture lignee presenti in solai coperture e strutture diverse.

Essa viene sempre eseguita mediante:

- analisi visiva da esperto in materiali lignei;
- analisi dello stato fessurativo;
- analisi del degrado per attacchi da insetti xilofagi;
- analisi e mappatura umidità;
- analisi dimensionali e caratteriali;
- analisi endoscopiche negli appoggi interni al muro e/o in sezioni da analizzare;
- analisi magnetometriche per rilevare le strutture metalliche interne alle murature e collegate alle strutture lignee (zanche, tiranti, perni, ecc.);
- analisi soniche effettuate nelle sezioni ph) sollecitate e in prossimità dei nodi principali e degli appoggi;
- prelievo di campioni per analisi batteriologica di laboratorio;
- prelievo campioni per analisi e caratterizzazione meccanica.

A richiesta può essere ultimata una prova di carico su un solaio tipo, esplicata con le modalità già citate precedentemente.

2.11. Analisi diagnostiche su strutture ed elementi lapidei

Analisi diagnostica su elementi lapidei che deve definire lo stato di conservazione ed il degrado di un elemento lapideo. Essa viene programmata mediante:

- analisi visiva e prelievo campioni superficiali per le verifiche di laboratorio (degrado, croste, ecc.);
- lettura dello stato fessurativo con analisi visiva
- termografica a analisi soniche;
- analisi dimensionale;
- analisi endoscopica interna;
- analisi magnetometrica per individuare strutture interne metalliche;
- comparazioni meccaniche ($\delta - E$) tra alcuni provini provenienti dalla cava e le strutture analizzate.

2.12. Monitoraggi

Rilievo strumentale di fenomeni transitori variabili nel tempo, che fornisce al restauratore elementi e dati tecnici determinanti ad un corretto intervento di ristrutturazione.

Il monitoraggio può essere:

1) *Monitoraggio strumentale consistente in*:
   - analisi;
   - monitoraggio;
   - interpretazione strutturale di fenomeni di degrado.
2) *Monitoraggio microclimatico consistente in*:
   - analisi;
   - monitoraggio;
   - interpretazione dei risultati microclimatici relativi ad ambienti utilizzati alla conservazione di opere artistiche (chiese, musei, ecc.).

2.13. Controlli non distruttivi convenzionali

Sono tutte quelle analisi largamente utilizzate nel controllo di qualità e sicurezza delta produzione industriale. Nel restauro artistico/architettonico sono utilizzati su strutture metalliche delle diverse leghe e in maniera combinata.

I più diffusi sono:

- gammagrafici;
- radiografici;
- magnetoscopici;
- liquidi penetranti;
- endoscopici;
- estensiometrici;

– ultrasonici;
– spessimetrici.

Attualmente sono molto utilizzati nel settore dell'ingegneria per la verifica del degrado e controllo di qualità di vecchie strutture metalliche (ponti, passerelle, viadotti).

2.14. Prove di laboratorio

Qualunque ciclo di analisi diagnostiche su strutture ed elementi, prevede una serie di analisi di laboratorio per aumentare le conoscenze specifiche più intime del manufatto da restaurare.

A seconda della tipologia di prova di laboratorio, esistono diverse norme di riferimento.

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva di alcune norme relative alle indagini strumentali.

Tabella 2.1. *Normative delle strumentazioni*

Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive	Normativa UNI EN ISO 9712:2012
Indagine sclerometrica (sc)	Normativa UNI EN 12504-2:2012
Indagine ultrasonica (ut)	Normativa UNI EN 12504-4:2005
Indagine sonica (so)	Normativa UNI 10627-1997
Indagine magnetometrica	Normativa BS 1881 – 204; DIN 1045; CP 110
Prove sul calcestruzzo nelle strutture – carote – prelievo, esame e prova di compressione	Normativa UNI EN 12504-1:2009
Prove sul calcestruzzo indurito – resistenza alla compressione dei provini	Normativa UNI EN 12390-3:2003
Profondità della carbonatazione mediante la prova alla fenolftaleina	Normativa UNI 9994:1992
Processi corrosivi del ferro di armatura	Normativa UNI 9535:1989
Pull – out	Normativa UNI EN 12504-3:2005
Pull – off	Normativa UNI-EN 1542:2000
Sonda di Windsor	Normativa ASTM C 803
Martinetti piatti (Singolo o Doppio)	Normativa ASTM C1196-09 – ASTM C1197-09
Termografia all'infrarosso	Normativa UNI 10824-1:2000
Termoflussimetria	Normativa ISO 9863/04

CAPITOLO 3

IL CALCESTRUZZO

3.1. La nascita del calcestruzzo

Il calcestruzzo è un conglomerato artificiale costituito da una miscela di legante, acqua e aggregati (sabbia e ghiaia) e con l'aggiunta, secondo le necessità, di additivi, e/o aggiunte minerali che influenzano le caratteristiche fisiche o chimiche del conglomerato sia fresco che indurito. Attualmente il legante utilizzato per confezionare calcestruzzi è il cemento, ma in passato sono stati realizzati calcestruzzi che utilizzavano leganti differenti come la calce aerea o idraulica. Il cemento, idratandosi con l'acqua, indurisce e conferisce alla miscela una resistenza tale da renderlo simile ad una roccia. È oggi utilizzato per realizzare le parti strutturali di un edificio ed è uno dei materiali da costruzione più impiegato nel mondo.

Dal latino *calcis structio*, struttura a base di calce, in seguito *calcestrutto* e infine *calcestruzzo*, risulta essere l'etimologia del termine che identifica questo materiale lapideo artificiale ottenuto dalla combinazione di inerti di varie granulometrie (aggregati lapidei), legati tra loro mediante il cemento (legante idraulico) che, a contatto con l'acqua, attiva la reazione chimica che ne permette la presa ed indurimento. Proprio per gestire i fenomeni chimici di presa e indurimento, nel calcestruzzo sono quindi aggiunti additivi in grado di permettere di rallentare o accelerare le reazioni al fine di ottenere caratteristiche ben definite.

Da quanto si deduce dagli scritti di Plinio il Vecchio e di Vitruvio, il calcestruzzo (*denominato opus caementitium*) era costituito da rottami di pietra o mattoni, mescolati con calce, acqua e pozzolana vulcanica o cocciopesto in sostituzione parziale o totale della comune sabbia fluviale. Il rottame di pietra usato per confezionare il calcestruzzo, veniva indicato in latino, anche da Livio e Cicerone, con il termine di *caementum*. Perciò, il calcestruzzo moderno non è un materiale nuovo bensì il perfezionamento di una sostanza già presente nell'antichità. Infatti, già nel *De architettura* (13 a.C.), Vitruvio descrive per la prima volta la fabbricazione della malta idraulica ottenuta mediante l'uso della pozzolana di Baia o di Cuma.

La scoperta della pozzolana, infatti, segnò un rivoluzionario progresso nelle antiche costruzioni in calcestruzzo poiché permetteva non solo di indurire all'interno di casseforme impenetrabili all'aria, ma anche e soprattutto sott'acqua. Il cemento utilizzato dai romani era costituito da sabbie non marine e povere di impurità. Il calcestruzzo era costituito da calcare puro CaO da cuocere per produrre la calce (*calcis coctores*). Per la confezione del calcestruzzo Vitruvio suggeriva: pezzi di tufo con una malta costituita da pozzolana (2 parti) e calce (1 parte). In seguito, nel 27 a.C., Agrippa intraprende l'edificazione del Pantheon, struttura di 43,4 m coperta da una cupola in calcestruzzo portante.

Vi sono ulteriori prove dell'esistenza nel passato di calcestruzzo di pozzolana che, nella maggior parte dei casi, veniva utilizzato come riempimento tra paramenti esterni in mattoni o in pietra che fungevano da casseri permanenti (murature a sacco). Infatti, lo spazio tra i paramenti in mattoni veniva riempito di malta ed aggregati quali pietre o rottami di mattoni. Cicerone scrive-

va: *Concretum corpus ex elementis* che comprende il significato di conglomerato spesso utilizzato per sostituire la parola calcestruzzo.

Nonostante siano molteplici le opere in cemento risalenti ai secoli precedenti, non tutte sono stimate come un bene da tutelare e restaurare. Nella comune percezione, infatti, il termine *cemento armato* ha spesso un'implicita connotazione negativa, in quanto, oggi è comunemente utilizzato per la messa in opera delle parti strutturali di un edificio e perché risulta difficile integrare strutture moderne in cemento con le circostanti strutture di importanza storica presenti sul territorio. L'idea ostile nei riguardi del calcestruzzo scaturisce anche dal fatto che non rispecchia le aspettative di alta durabilità, duttilità ed utilizzabilità nella realizzazione di forme particolari, infatti, è possibile riscontrarne un rapido degrado se si trascura la manutenzione. In realtà, nato convenzionalmente nel 1898, il calcestruzzo risulta di fatto essere un materiale storico, pertanto, sono molteplici gli edifici in cemento armato considerati *monumentali*. Di conseguenza, i problemi correlati al restauro, conservazione e sicurezza dei manufatti in cemento armato, costituiscono uno dei problemi più sentiti del nostro secolo.

Occorre sottolineare, tuttavia, le notevoli diversità che caratterizzano le opere realizzate tra la fine del XIX secolo e i primi decenni del XX. Le prime, invero, sono state perlopiù progettate e costruite con minuziosa cura e reverenziale attenzione per il nuovo materiale. Le ultime, invece, edificate negli anni del grande sviluppo edilizio (anni '50-'70) risultano essere quelle che dimostrano le maggiori problematiche dovute all'utilizzo di calcestruzzi di scarsa qualità, con insufficienza di ferri e con dimensioni esigue.

Il primo passo per sapere quali siano le problematiche da affrontare è quello di eseguire opere di verifica che potrebbero essere più veloci e significative se l'edificio fosse dotato di un *fascicolo del fabbricato* contenente tutte le caratteristiche identificative delle strutture e le prescrizioni per gli interventi di manutenzione.

In passato, i provvedimenti sui manufatti in calcestruzzo erano attuati secondo l'intuito dei progettisti, oggi, invece, la tecnica delle costruzioni in cemento armato ha definito le regole fondamentali di calcolo e di esecuzione dei vari elementi strutturali.

I principali difetti riscontrati nei vecchi edifici in cemento armato, edificati tra il 1900 e 1960, ovvero per tutto il periodo di validità del Regio Decreto del 16 novembre 1939, sono dovuti alla inosservanza di norme sismiche, in quanto inesistenti, che ha dunque permesso una realizzazione di esigue sezioni resistenti con una scarsa quantità di cemento negli impasti che ha portato a rapidi fenomeni di degrado, quali:

- ossidazione delle armature per insufficiente copriferro;
- maggiore porosità degli impasti;
- eccessive deformazioni per fenomeni di fluage in travi e solai, con conseguenti danni a pavimenti e murature sovrastanti;
- cedimenti strutturali.

Per intervenire sulle problematiche riscontrate occorre conoscere il comportamento del calcestruzzo e degli elementi che lo costituiscono per poi attuare azioni migliorative sulle strutture. Il calcestruzzo moderno, oltre che sulla disponibilità del cemento Portland, si basa sulla disponibilità di un mezzo meccanico (betoniera) capace di mescolare la miscela plastica di acqua, cemento, sabbia e ghiaia (o pietrisco) che viene successivamente gettata all'interno delle casseforme. La betoniera non era disponibile all'epoca del calcestruzzo antico dei Romani. Il modo di edificare un muro in calcestruzzo romano, è schematicamente illustrato in cinque fasi:

- **Fase 1**: veniva innanzitutto costruita la fondazione.
- **Fase 2**: la malta era prodotta da un muratore a piè del muro mescolando acqua, calce e pozzolana con l'ausilio di una marra.
- **Fase 3**: veniva quindi montata l'impalcatura per la costruzione dei paramenti in mattone o pietra che fungevano da casseri permanenti.
- **Fase 4**: la malta prodotta a piè d'opera veniva trasportata da un secondo muratore in contenitori fino alla sommità dei paramenti già predisposti.
- **Fase 5**: la malta veniva versata dai contenitori all'interno dei paramenti murari ed un terzo muratore provvedeva a costipare la malta ed a conficcare manualmente i rottami di pietra (*caementum*) o mattoni all'interno della malta.

L'inglobamento manuale dell'aggregato grosso all'interno della malta, già gettata entro i paramenti murari, doveva quindi avvenire separatamente dalla miscelazione degli ingredienti della malta. Si preferiva anche introdurre come aggregato grosso non una ghiaia, come avviene nei moderni calcestruzzi ma rottami di pietra o mattoni di grosse dimensioni per meglio conficcare manualmente l'aggregato grosso nella malta e, nel contempo, per diminuire quanto più possibile il volume di malta (più costosa).

Una conseguenza di questa tecnica costruttiva è la netta differenza dimensionale del rottame di pietra (o mattone) e della sabbia.

Al contrario, in un calcestruzzo moderno si cerca di attuare la massima continuità granulometrica degli aggregati in modo da favorire il massimo inserimento dei granuli fini (sabbia) nei vuoti interstiziali dei granuli intermedi (ghiaietto), e dei granuli di questo aggregato nei vuoti interstiziali tra i granuli più grossi (ghiaia). Questa operazione richiede mezzi meccanici rapidi ed efficaci per selezionare gli aggregati mediante vagliatura e per mescolarli insieme agli altri ingredienti del calcestruzzo all'interno di una betoniera.

Il risultato della continuità granulometrica degli aggregati in un moderno conglomerato è la riduzione al minimo del volume dei vuoti interstiziali tra i granuli degli aggregati e quindi anche il volume di pasta cementizia che avvolge gli aggregati per formare, a indurimento avvenuto, un elemento monolitico artificiale.

La minimizzazione dei vuoti tra gli aggregati è di fondamentale importanza per ottenere calcestruzzi dimensionalmente stabili caratterizzati da un elevato modulo elastico e un basso ritiro igrometrico quando sono esposti ad ambienti asciutti.

3.2. Fattori che influenzano la resistenza del calcestruzzo

I fattori che influenzano la resistenza del calcestruzzo sono:

- *Quantità di cemento*: la resistenza del calcestruzzo aumenta quasi proporzionalmente al quantitativo di cemento impiegato; tuttavia dosi eccessive (> 500 kg/m^3) sono inutili o addirittura dannose.
- *Composizione degli inerti*: gli inerti devono essere di buona qualità, puliti e dosati accuratamente.
- *Rapporto acqua/cemento*: per la presa sono necessari circa 30 litri di acqua per ogni quintale di cemento, ma per rendere il calcestruzzo lavorabile questa quantità deve aumenta-

re (circa il doppio). Tuttavia all'aumentare del rapporto acqua/cemento le prestazioni del calcestruzzo peggiorano drasticamente. L'aggiunta di fluidificanti consente, quindi, l'impiego di valori più bassi del rapporto acqua/cemento.

– *Condizioni ambientali durante la maturazione*: la velocità della presa del cemento aumenta rapidamente con la temperatura. Il caldo secco e l'insolazione diretta sono dannosi, perché producono l'evaporazione dell'acqua superficiale. Il getto in estate deve essere tenuto coperto e bagnato. Il freddo rallenta la presa. Se l'acqua gela, la formazione del ghiaccio interrompe il processo e la dilatazione interrompe i legami già formati.

3.3. Il degrado del calcestruzzo

Il degrado del calcestruzzo costituisce un rilevante aspetto dell'ampio problema della corrosione dei materiali.

Ritenuto per anni inalterabile e di durata illimitata al punto da essere definito una pietra artificiale, in realtà il calcestruzzo armato è soggetto a fenomeni di degrado che ne alterano le proprietà. Per garantire, quindi, la durabilità delle strutture in cemento armato è fondamentale la conoscenza dei più importanti meccanismi di degrado e della determinazione dei fattori che influenzano la velocità degli stessi.

Gli elementi corrosivi dell'atmosfera che possono generare il decadimento dei materiali e delle proprietà tecnologiche sono:

– ossigeno, quale ossidante e sostenitore delle reazioni catodiche;
– vapore d'acqua che, per condensazione sulle superfici, risulta solvente ideale;
– gas, quali l'anidride carbonica, l'anidride solforosa, ecc.

In presenza di questi componenti, i fenomeni corrosivi sono divenuti la prima conseguenza diretta del rapido ed imprevedibile degrado del calcestruzzo armato che non può quindi più essere considerato un materiale inalterabile per eccellenza e di durata illimitata.

Oltre alla natura degli agenti aggressivi dell'atmosfera (CO_2, SO_2, Cl, ecc.) altri fattori influenzano il comportamento del calcestruzzo mettendo in pericolo la durabilità delle strutture in cemento armato, quali:

– la composizione degli elementi che costituiscono il calcestruzzo (cemento, sabbia, inerti, ecc.);
– la sua età;
– le tecniche di posa in opera;
– le condizioni climatiche.

Le alterazioni che si possono presentare sono quindi di ordine: meccanico, fisico, chimico-fisico, chimico e sono sempre associate alla presenza di acqua che gioca un ruolo principale, da un debole fenomeno di dissoluzione fino a fenomeni più complessi di assorbimento, risalita capillare all'interno della struttura porosa del calcestruzzo, ecc..

3.4. Durabilità del calcestruzzo

La durabilità del calcestruzzo dipende da un aspetto molto importante, quale il *mix design*, ovvero la scelta di un adeguato rapporto acqua/cemento e del volume di micro bolle d'aria inglobato.

Il *mix design* persegue l'obiettivo di confezionare una miscela *ideale* nella quale ferri di armatura, aggregati lapidei e micro bolle d'aria siano dispersi in una pasta a bassa porosità. Diverse condizioni di esercizio rispetto a quelle prestabilite, potrebbero sicuramente vanificare molti degli accorgimenti studiati in laboratorio: carichi statici e dinamici, escursioni termiche, variazioni delle condizioni igrometriche, scarsa stagionatura, carenze della manovalanza, possono portare alla formazione di fessurazione che rappresentano un cammino preferenziale degli agenti aggressivi dell'ambiente (aria, acqua, ioni solfati cloruro, ecc.). Ciò vuol dire che la formazione di elementi di degrado prescinde dalla qualità della pasta cementizia. Quando si richiede una vita di servizio di 20-30 anni per strutture esposte alle generiche condizioni aggressive dell'ambiente, si possono anche ignorare i problemi associati alla presenza di micro fessure e la loro trasformazione in macro fessure: è sufficiente, pertanto, prevedere un calcestruzzo le cui prestazioni siano in accordo con le norme europee o le raccomandazioni nazionali sulla durabilità delle opere in conglomerato cementizio.

Per opere di particolare interesse architettonico o sociale (chiese, tunnel, ponti ecc.), si arriva a richiedere una vita utile compresa tra i 50 e i 200 anni, tempi mai sperimentati per le moderne strutture in calcestruzzo armato. Per ottenere, quindi, un calcestruzzo ad alta durabilità occorre innanzitutto produrre un calcestruzzo di ottima qualità e avere un rivestimento protettivo elastico che possa prevenire la penetrazione di agenti aggressivi attraverso le microfessurazioni eventualmente formatesi.

Per ovviare al problema delle micro fessurazioni, sarebbe ideale applicare una pellicola protettiva che sufficientemente elastica atta a coprire le fessure che si formano nel substrato rigido di calcestruzzo. Recenti sviluppi di questa strategia hanno portato, anche in Italia, alla produzione di un rivestimento elastico protettivo, formato da cemento flessibilizzato con polimeri, per la protezione delle strutture in calcestruzzo dall'insorgere delle micro fessure causate dalle severe condizioni di servizio.

3.4.1. *La carbonatazione*

L'anidride carbonica presente nell'atmosfera (concentrazioni dell'ordine di 600-1000 mg/l), quando viene a contatto con il calcestruzzo, neutralizza i suoi componenti alcalini a partire dagli strati più esterni.

Il pH della soluzione contenuta nei pori si riduce dai valori usuali (attorno a 13-14) a valori inferiori a 9, cioè ben al di sotto del pH 11.5 che, come già accennato, è il valore necessario per assicurare, in assenza di cloruri, le condizioni di passività dell'armatura.

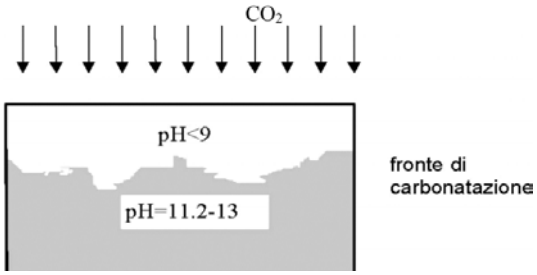


Figura 3.1. *Processo di carbonatazione*

Una volta che l'armatura risulta *depassivata* e sono presenti sulla sua superficie acqua e ossigeno, si produce una corrosione di tipo generalizzato.

Riguardo il processo di carbonatazione, non vi è corrosione se l'acqua e l'ossigeno non sono presenti sulla superficie delle armature o lo sono in quantità molto bassi. Ad esempio, in un calcestruzzo carbonatato, la corrosione risulta trascurabile sia quando si trova a contatto con una atmosfera di umidità relativa < 70% (per mancanza d'acqua) sia quando è immerso in acqua (per scarsa presenza di ossigeno sulla superficie delle armature). Di conseguenza le condizioni di umidità ambientale più critiche per il prodursi della corrosione (una volta che la carbonatazione è avvenuta) sono quelle con umidità relativa compresa tra 80 e 98% oppure quelle caratterizzate da condizioni di alternanza asciutto/bagnato.

La carbonatazione inizia sulla superficie esterna e penetra verso le regioni più interne con velocità decrescente. La velocità con cui il processo di carbonatazione avanza all'interno del calcestruzzo, dipende da fattori relativi al calcestruzzo stesso e da fattori ambientali quali:

- permeabilità (e quindi i fattori che la determinano quali il rapporto acqua/cemento, la compattazione e maturazione del getto);
- riserva di alcalinità (e quindi il tipo e la quantità di cemento impiegato);
- umidità atmosferica (*K* è massimo nell'intervallo compreso tra il 50 e il 70%);
- presenza di bagnature intermittenti, come quelli provocate dalla pioggia, che riducono *K*.

3.5. Le indagini diagnostiche

Le NTC 2018, al paragrafo 11.2.6 (*Controllo della resistenza in opera*) del capitolo 11, prevedono per la determinazione della resistenza alla compressione in opera, finalizzata alla soluzione di non conformità emerse durante i controlli di accettazione di forniture di calcestruzzo, il ricorso al prelievo di calcestruzzo indurito, secondo UNI EN 12504-1, eventualmente integrato dai controlli non distruttivi secondo le UNI EN 12504-2, UNI EN 12504-3, UNI EN 12504-4. Tali norme sono richiamate esplicitamente nelle NTC 2018.

La norma prevede per gli interventi su costruzioni esistenti l'impiego, in sostituzione dei controlli distruttivi indicati dalla norma, di metodi non distruttivi. Il ricorso a tecniche non distruttive non può superare il 50% dei minimi controlli distruttivi previsti e deve essere almeno pari al triplo dei controlli sostituiti. La non conformità nelle nuove costruzioni e la valutazione della sicurezza nelle costruzioni esistenti, riguardano la gran parte dei casi in cui si determina l'impiego di controlli in opera, distruttivi e non distruttivi.

È evidente che le indagini sulle strutture richiedono, perché i risultati siano riproducibili, un approccio rigoroso nella esecuzione delle prove e nella certificazione dei risultati.

Riteniamo che ciò sia coerente con lo spirito delle NTC 2018, quando queste codificano le procedure di prova indicando esplicitamente le relative norme UNI EN, e della circolare del 2 settembre 2010, n. 7617, che prevede che i risultati di tali prove siano certificati dai laboratori (*ex art. 59 – D.P.R. n. 380/2001*), come estensione della più generale autorizzazione, ovvero che i *controlli non distruttivi* (CND) debbano essere eseguiti, e certificati, da società che operano in regime di autorizzazione da parte del Ministero Infrastrutture e Trasporti ovvero da società il cui sistema di qualità sia tale da garantire l'indipendenza, l'efficienza delle attrezzature e la continua formazione del personale. Tale affermazione trova ulteriore conferma nel fatto che se l'eventuale non conformità di un controllo di accettazione viene rilevata sulla scor-

ta di risultati emessi da un Laboratorio autorizzato (*ex art. 59 – D.P.R. n. 380/2001*), e quindi con attrezzature efficienti, personale esperto, indipendente ed oggetto di verifiche periodiche da parte del Servizio Tecnico Centrale, la soluzione della non conformità, proposta dal Direttore dei Lavori, non può essere demandata ad un soggetto generico, con caratteristiche non coerenti con i requisiti di indipendenza, efficienza e qualità previsti per i laboratori autorizzati (*ex art. 59 – D.P.R. n. 380/2001*).

Per le stesse ragioni le caratteristiche dei materiali sulle costruzioni esistenti devono essere determinate da laboratori in possesso degli specifici requisiti di indipendenza, efficienza e qualità propri dei laboratori autorizzati (*ex art. 59 – D.P.R. n. 380/2001*).

La diagnosi del degrado di una qualsiasi tipologia di struttura passa attraverso la raccolta di una serie di dati di carattere storico, ambientale, strutturale, ecc., che consentono di stabilire, con una certa precisione, le cause che hanno portato al deterioramento della struttura.

La raccolta di informazioni avviene attraverso l'esecuzione di una serie di prove che vengono suddivise in base al carattere *invasivo* delle stesse rispetto al materiale in esame, e si articolano in:

- distruttive;
- non distruttive.

Le prime di basano su prove sperimentali di carattere chimico, fisico o meccanico, eseguite perlopiù in laboratorio e prevedono comunque un prelievo di campioni materici.

Le seconde, invece, di carattere prevalentemente fisico o fisico-meccanico, si eseguono quasi sempre in sito e non prevedono in alcun modo sottrazioni di materiale alla struttura.

In base a quanto detto, parrebbe logico prediligere le seconde alle prime ma quasi mai, con le sole prove non distruttive, si riesce ad elaborare una diagnosi corretta. Infatti, le prove non distruttive, da eseguirsi generalmente prima delle altre, hanno il compito di guidare il tecnico a prelievi ben mirati da sottoporre, poi, a prove di laboratorio.

Il carattere complementare delle due modalità di prove, oltre alla completezza delle informazioni ricavate, ha anche il vantaggio di ridurre al minimo il numero di prove e conseguentemente di ridurre globalmente i costi.

È per questo che andremo ad analizzare i vari tipi di prove.

Le prove dirette di resistenza su campioni prelevati dagli elementi strutturali sono considerate prove distruttive mentre con le prove indirette si misurano certe caratteristiche fisiche o chimiche da cui si ricava una stima della resistenza attraverso correlazioni, in genere di tipo empirico in genere sono prove moderatamente o affatto distruttive.

Le prove dirette sono, ad esempio i carotaggi ed i microcarotaggi, mentre le prove indirette sono ad esempio le non distruttive:

- sclerometro;
- velocità di propagazione degli ultrasuoni;
- metodi combinati (SON-REB).

Le peculiarità di queste prove possono essere così sintetizzate mantengono integra o quasi la struttura, informano in modo globale, rapido e semplice e forniscono risultati sia qualitativi che quantitativi che possono comunque essere oggetto di comparazione.

Le prove moderatamente distruttive sono le prove di estrazione (*pull-out test*) con inserti pre-inseriti oppure con inserti post-inseriti, la prova di penetrazione (*Windsor Probe Test*), la *pull-off* e la *break-off*.

3.6. La documentazione fotografica

Più che una prova non distruttiva, una buona documentazione fotografica rappresenta il punto di partenza dell'analisi, risultando fondamentale per l'esatta individuazione spaziale dei fenomeni di degrado.

Pur rappresentando il primo approccio col manufatto degradato può, altresì, essere utilizzata per monitoraggi temporali atti a verificare l'andamento e l'eventuale aggravamento dei fenomeni di degrado. Essa dovrebbe documentare la localizzazione dei fenomeni con vedute d'insieme e di dettaglio, con scatti che andrebbero catalogati per semplificare future analisi.

3.7. Il metodo dei carotaggi

Consiste nel prelievo di campioni (carote) dalle strutture finite, per mezzo di apposite attrezzature dotate di mole a corona diamantata.

Sulle carote si possono effettuare:

- prove di compressione;
- prove di trazione indiretta;
- prove per la determinazione del modulo elastico e del modulo di Poisson;
- prove chimiche.

Il carotaggio del calcestruzzo permette una valutazione della resistenza meccanica attraverso la prova di compressione in laboratorio dei provini cilindrici prelevati in sito.

Il numero di carote da prelevare per caratterizzare il materiale dell'elemento strutturale in studio non deve essere inferiore a 3.

Le carotatrici hanno punte con diametri di 7, 10, 14 e 16 cm che vanno scelte, tendendo al diametro massimo, in funzione delle difficoltà del sito.

La scelta del diametro della carota dovrà tenere conto di alcuni aspetti:

- la riduzione della sezione resistente dell'elemento in studio;
- evitare il taglio di armature;
- il diametro dell'inerte.

L'operazione di carotaggio è particolarmente delicata in quanto, se non eseguita correttamente, potrebbe compromettere i risultati.

Sono quindi importanti alcuni aspetti:

- utilizzare punte perfettamente cilindriche e ben affilate;
- fissare rigidamente la carotatrice evitando qualunque vibrazione;
- utilizzare abbondantemente l'acqua di raffreddamento.

Tutti i fori andranno riempiti con malta di cemento a presa rapida.

Il trasporto dovrà avvenire con la massima cautela, onde evitare la formazione di fessurazioni per vibrazione, proteggendo la carota con appositi materiali morbidi ed inserendola in una cassetta di trasporto rigida.

Le carote saranno tagliate e rettificate presso un Laboratorio Prove Materiali Autorizzato, in base alla normativa UNI EN 12390-1 e UNI EN 12390-3, che fornirà la resistenza cilindrica di compressione.

Il valore della resistenza cubica è ottenuta da quella cilindrica attraverso la relazione:

$$R_{cub} = R_{cil}\ 0{,}83 \text{ per } h/d > 2$$

Per rapporti inferiori è introdotto un fattore di correzione ricavabile dalle norme ASTM C 42:68 e la relazione diventa:

$$R_{cub} = F_C \cdot R_{cil} \cdot 0{,}83$$

h/d	F_C
2	1,00
1,75	0,99
1,50	0,97
1,25	0,94
1,00	0,91

La resistenza misurata sulle carote è influenzata, oltre che dai fattori che modificano la resistenza in situ rispetto a quella dei campioni standard, da altri fattori connessi col metodo di prova:

- *Operazioni di perforazione/prelievo del campione*: si crea un disturbo al materiale;
- *Posizione del campione*: si osserva un decremento di resistenza nelle carote prelevate in direzione normale a quella di getto, in genere in direzione orizzontale; si tende a prelevare strati superficiali più debole;
- *Coefficiente di allungamento del campione*: rapporto altezza/diametro della carota;
- *Dimensioni del campione rispetto a quelli degli inerti*: per rapporti piccoli fra rapporto campione dimensione massima degli inerti si ha un sensibile aumento del coefficiente di variazione (la normativa impone rapporto minimo pari a 3);
- *Presenza di spezzoni di armatura*.

3.7.1. *Indebolimento delle strutture in conseguenza delle operazioni di carotaggio*

Le zone in cui effettuare i carotaggi devono essere scelte in modo da non alterare la capacità portante dell'elemento strutturale. Particolare attenzione in prossimità dei nodi strutturali.

Negli elementi compressi (pilastri) occorre assolutamente evitare di effettuare fori in posizione eccentrica. Nelle travi, sono preferibili le zone ai quarti della luce e all'altezza dell'asse neutro. Non ci si deve comunque attendere che la riduzione di capacità portante delle strutture soggette a compressione possa essere completamente compensata dal riempimento del foro mediante malte additivate.

3.7.2. *Microcarotaggio*

Se il diametro delle carote è inferiore a 3 volte il diametro massimo dell'inerte, allora le carote sono dette *microcarote* i risultati di resistenza che si ottengono dalla prova a compressione su microcarote sono molto dispersi; questo fatto dipende dalla distribuzione casuale degli inerti: carote di piccolo diametro prelevate dallo stesso getto possono differire l'una dall'altra per le dimensioni massime degli inerti contenuti in ciascuna; inoltre, alcuni inerti piccoli o frantumi di inerti possono distaccarsi dalla superficie laterale indebolendo la sezione, in misura maggiore quanto più questa è piccola.

Per ottenere risultati affidabili, occorre effettuare le prove su un numero maggiore di campioni; è possibile comunque estrarre un numero ridotto di microcarote sufficientemente lunghe, da poter ricavare, da ciascuna di queste, più campioni.

3.8. Prova sclerometrica

Lo sclerometro consiste in una massa battente di acciaio, azionata da una molla, che contrasta un'asta di percussione a contatto sulla superficie di prova del calcestruzzo. Il principio si basa sulla misura del rimbalzo di un corpo (con energia nota) sulla superficie del calcestruzzo, in quanto il rimbalzo di una massa elastica dipende dalla durezza della superficie su cui urta.

Il valore di rimbalzo della massa battente è misurata mediante un indice di lettura trascinato su una scala lineare alloggiata nella cassa dello sclerometro.

Per l'esecuzione della prova vanno rispettate delle regole di buona esecuzione:

- indagare su elementi di spessore >150 mm;
- evitare zone che presentano nidi di ghiaia, scalfitture, porosità elevata;
- individuare preventivamente la tessitura di armatura mediante strumento pacometrico;
- l'asse dello strumento dovrà essere perfettamente ortogonale alla superficie da indagare;
- utilizzare esclusivamente sclerometri che lasciano una traccia cartacea delle battute.

Devono essere eseguite 12 battute scartando i due valori maggiori e mediando i 10 rimanenti. L'indice di rimbalzo medio si ricava come media dei valori misurati. È opportuno valutare anche la deviazione standard: se i valori sono troppo dispersi, la prova è poco affidabile. L'indice di rimbalzo va trasformato in resistenza cubica attraverso le curve di correlazione legate alla direzione d'uso dello sclerometro.

Lo sclerometro è uno strumento indicato per una valutazione su calcestruzzi giovani, in quanto il fenomeno della carbonatazione del calcestruzzo provoca l'indurimento dello strato superficiale provocando una alterazione del fenomeno di rimbalzo. Gli sclerometri vanno tarati una volta all'anno.

La resistenza e durezza sono correlate fra loro e l'energia di impatto, costante caratteristica dello strumento, viene in parte assorbita dal calcestruzzo sotto forma di deformazioni anelastiche permanenti ed in parte restituita alla massa mobile che rimbalza: quindi quanto maggiore è la resistenza del materiale, tanto minori sono le deformazioni permanenti e quindi tanto maggiore risulta l'altezza di rimbalzo.

Gli sclerometri a molla sono essenzialmente costituiti da una massa battente in acciaio, azionata da una molla, che contrasta un'asta di percussione che è a diretto contatto con la superficie del calcestruzzo su cui si deve effettuare la prova sclerometrica.

Per usare lo strumento si deve premere l'asta di percussione sulla superficie da provare fino all'arresto. In questo modo la massa contenuta nell'apparecchio viene caricata per mezzo di una molla, di una quantità fissa di energia. Si libera poi la massa, la quale urta contro il percussore ancora in contatto con la superficie e rimbalza, l'entità del rimbalzo è misurata da un indice che scorre lungo una scala graduata presente sullo strumento. Il valore di rimbalzo, opportunamente parametrizzato in funzione anche dell'angolo di battuta, fornisce un'indicazione orientativa della resistenza del calcestruzzo.

La prova ha dei limiti intrinseci in quanto la valutazione è basata sulla resistenza di uno strato di piccolo spessore (da 1 a 3 cm circa) della superficie dell'elemento strutturale, strato che peraltro risulta poco rappresentativo a causa delle alterazioni che subisce per fattori ambientali. Nel caso che la superficie esterna risulti compromessa, occorre raggiungere strati più profondi (eliminazione di intonaco o calcestruzzo deteriorato) senza alterare però le condizioni di *superficie levigata* che sono essenziali per il fenomeno di rimbalzo (viene spesso utilizzata una pietra pomice per rimuovere gli strati più superficiali).

La risposta dello strumento deve essere controllata periodicamente sull'incudine di riferimento. Le misure devono essere effettuate su una superficie di circa 20×20 cm, priva di difetti superficiali, lontana dalle barre di armature, e adeguatamente preparata e pulita per eliminare le asperità superficiali.

Tra i parametri che possono falsare la prova i più comuni sono:

- *Umidità del materiale*;
- *Snellezza dell'elemento strutturale*: per elementi monodimensionali lo spessore deve essere almeno di 12 cm per quelle bidimensionali almeno di 10 cm;
- *Carbonatazione del calcestruzzo*: poiché il fenomeno della carbonatazione provoca l'indurimento dello strato superficiale provocando così un'alterazione del fenomeno di rimbalzo, lo sclerometro è indicato per verifiche su calcestruzzi giovani;
- *Presenza di armature o di inerti grossolani affioranti in corrispondenza dei punti di battitura*: la battuta effettuata in corrispondenza di sottostanti armature o inerti grossolani affioranti falsa i valori di rimbalzo innalzando l'indice di rimbalzo;
- *Imperfetta taratura dello strumento*;
- *Strumento non perfettamente ortogonale alla superficie da provare*: l'inclinazione dello strumento influenza il valore dell'indice di rimbalzo;
- *Zone con difetti superficiali come nidi di ghiaia, porosità eccessiva, giunti tecnici, ecc.*: la presenza di vuoti penalizza il valore degli indici di rimbalzo minori. Infatti lo sclerometro va usato soltanto su calcestruzzi a struttura chiusa e pertanto si debbono escludere quelli leggeri, cellulari o porosi (calcestruzzi a struttura aperta).

È sconsigliabile fare prove sulla superficie libera (non a contatto con casseri) di un getto in quanto questa zona è in genere ricca di parti più fini ed è caratterizzata da elevati rapporti acqua/cemento, ha subito una maggiore evaporazione. È opportuno non effettuare prove nelle zone prossime agli spigoli: è sufficiente porsi a distanze dell'ordine di 10 cm. I punti dove si effettuano le battute devono essere sufficientemente distanti fra loro per evitare una influenza reciproca (almeno 2-3 cm). Prima di ogni prova si deve verificare che il colpo non interessi degli inerti di grandi dimensioni.

È sconsigliabile l'uso di uno sclerometro quando:

- si hanno zone con difetti locali nel getto;
- i calcestruzzi sono realizzati con inerti di elevate dimensioni (maggiori di 40 mm);
- i calcestruzzi hanno una resistenza ridotta (< 15 MPa) (si rischia di fare misure solo sull'inerte);
- i calcestruzzi sono molto vecchi o molto giovani (< 3 gg.);
- si è in prossimità di cavi di precompressione (comportamento fortemente influenzato dallo stato tensionale);
- si hanno elementi molto sottili in direzione ortogonale alla prova (< 100 mm);
- i calcestruzzi non hanno una qualità uniforme allontanandosi dalla superficie (calcestruzzi soggetti a gelo, aggressioni di carattere chimico, fuoco, ecc.).

La dispersione dei risultati riguardanti uno stesso tipo di materiale è piuttosto piccola; pertanto, le prove sclerometriche si prestano bene per rilevare l'uniformità delle caratteristiche del calcestruzzo nelle strutture o per misure di confronto con calcestruzzi di caratteristiche note. Nella determinazione della resistenza del calcestruzzo in situ, invece, sono molti i fattori che influenzano le misure sclerometriche: tipo di cemento, tipo di aggregato, tipo di superficie, umidità super-

ficiale, carbonatazione, età del calcestruzzo, modalità di maturazione, compattazione. È quindi molto importante tener conto degli effetti dei vari fattori di influenza per una corretta interpretazione delle prove sclerometriche.

Figura 3.2. *Sclerometro*

3.9. La prova ultrasonica

La prova ultrasonica ha una funzione di misura dell'omogeneità del materiale e non di misura diretta della resistenza del calcestruzzo. Questo tipo di prova non distruttiva, non invasiva e soprattutto rapida nell'esecuzione, consente di ottenere una valutazione complessiva sulle caratteristiche del materiale potendola estendere velocemente in molti punti.

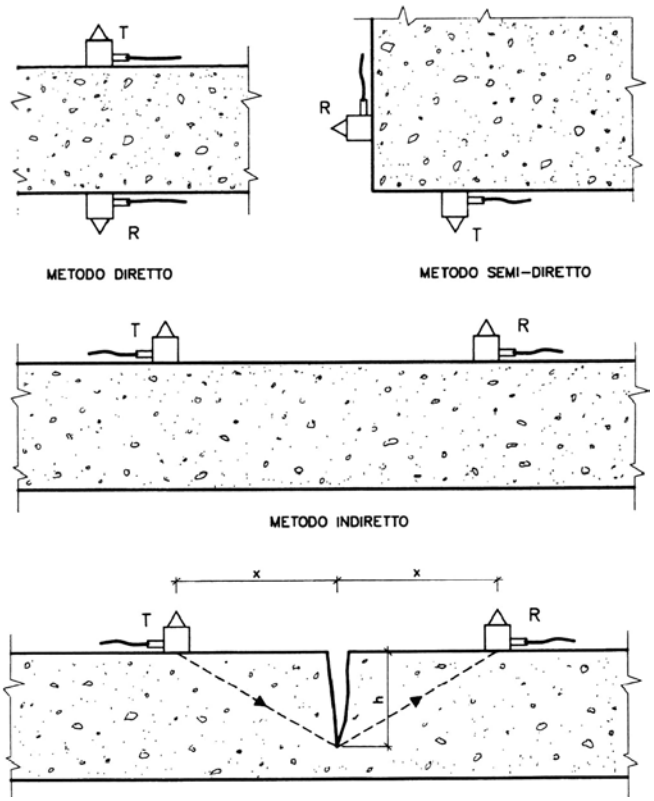


Figura 3.3. *Metodi diretto, semidiretto, indiretto*

La misura si ottiene ponendo le sonde, emettitrice e ricevente, nelle facce opposte nel caso di spessori fino 50 cm, o su una linea superficiale. La sonda emettitrice produce degli impulsi ultrasonici che sono captati dalla sonda ricevente dopo che tali impulsi hanno attraversato il materiale interposto. Il tempo di transito è misurato e memorizzato dallo strumento. Per una prima valutazione dei risultati sperimentali si utilizza una tabella comparativa che lega la velocità di propagazione dell'onda ultrasonica a valori di resistenza per materiale asciutto.

La prova consiste nella determinazione della velocità di propagazione degli impulsi delle onde longitudinali ultrasoniche nel calcestruzzo.

La prova è basata, infatti, sulla velocità con cui gli impulsi delle onde meccaniche (vibrazioni) si propagano in un mezzo è funzione delle caratteristiche elastiche del mezzo stesso (modulo di elasticità e modulo di Poisson dinamici) e della sua densità. I parametri elastici del materiale (modulo di Young e di Poisson) sono correlati alla sua resistenza.

Il metodo diretto è l'unico che dà risultati di una certa affidabilità. Utilizzazione del metodo per la misura della profondità delle lesioni è poco affidabile nel calcestruzzo.

La misura della velocità degli ultrasuoni, insieme a quella di attenuazione dell'onda, fornisce indicazioni affidabili circa difetti interni del calcestruzzo (l'onda è tanto più attenuata quanto più piccola è l'ampiezza del segnale in arrivo).

- **Traiettorie 1 e 6**: le misure forniscono di valori di velocità e di attenuazione relativi al calcestruzzo di base.
- **Traiettoria 2** (fessura priva di zone di contatto fra i lembi): velocità più bassa fessura con zone di contatto fra i lembi: velocità circa uguale, attenuazione maggiore.
- **Traiettoria 3** (presenza di un vuoto): velocità minore e attenuazione maggiore.
- **Traiettoria 4** (presenza di un vespaio, cioè di vuoti con piccole zone di contatto): velocità circa uguale, marcata attenuazione.
- **Traiettoria 5** (zona di calcestruzzo con diverse caratteristiche elastomeccaniche): diversa velocità.

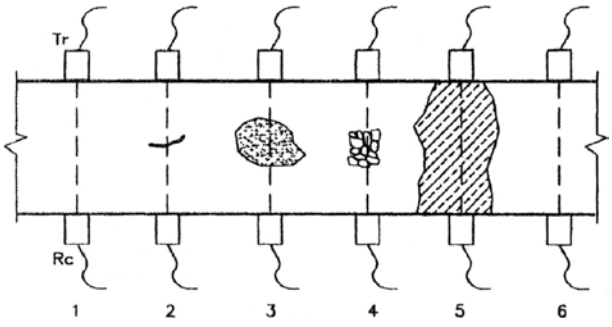


Figura 3.4. *Traiettorie*

La stima della resistenza presenta delle difficoltà legate alla eccessiva sensibilità della strumentazione in rapporto alla disomogeneità interna del materiale: percentuale di vuoti, forma e dimensione degli aggregati, presenza di barre di armatura.

Per questo è opportuno eseguire sempre misure della velocità e dell'attenuazione. Quando le variazioni di velocità sono accompagnate da variazioni dell'attenuazione, siamo in presenza di difetti e non di differenze delle caratteristiche delle proprietà meccaniche.

La stima della resistenza dovrà essere fatta sulla base dei valori di velocità in corrispondenza dei quali si registra la minore attenuazione.

L'affidabilità del metodo in sé è piuttosto scarsa, ma può fornire buoni risultati se utilizzato in combinazione con altri metodi di indagine.

In questo modo si cerca di neutralizzare gli effetti dei fattori di disturbo come ad esempio il grado di umidità e grado di maturazione che influenzano la velocità di propagazione con effetto opposto rispetto a quanto rilevato per le prove sclerometriche. Va inoltre precisato che la trasformazione da velocità del suono a resistenza è molto indicativa.

3.10. Prova di resistenza alla penetrazione: sonda Windsor

Il principio di base della prova è che la profondità di penetrazione, in condizioni normalizzate, aumenta in ragione inversa alla resistenza del materiale. Una certa analogia con lo sclerometro perché si basa su una misura di durezza superficiale, ma si spinge maggiormente in profondità che risente pertanto meno dell'influenza della carbonatazione e dell'umidità superficiale. Il metodo consiste nell'infiggere nel calcestruzzo una sonda metallica di forma e dimensioni prefissate, proiettata da una carica esplosiva calibrata. Il risultato della prova è fornito dalla lunghezza del tratto di sonda emergente dalla superficie del getto.

Il rapporto fra penetrazione e resistenza dipende dalla durezza degli inerti, che deve essere misurata preventivamente, nella scala Mohs, utilizzando campioni di confronto. Esistono tabelle di correlazione, una relativa a *potenza standard*, l'altra a *bassa potenza*, ciò in relazione alla possibilità di utilizzare cariche di due potenze diverse, a seconda della maggiore o minore presumibile resistenza del calcestruzzo. La correlazione fornita dal costruttore non è sempre valida; in particolare, non è affidabile per calcestruzzi vecchi

3.11. Pull-out test

La metodologia d'indagine consente di determinare la resistenza media del calcestruzzo, R_{mc}, mediante l'estrazione di un tassello post-inserito.

Il sistema è stato sviluppato in modo da permettere l'inserimento di un tassello post-opera. Il tassello è inserito in un foro appositamente svasato internamente; attraverso la battitura della testa del tassello si produce l'allargamento della parte radiale interna consentendo così una perfetta adesione alle pareti. Viene quindi applicato un martinetto oleodinamico che poggia su una superficie circolare; attraverso il tiro del tassello si determina la rottura di un cono di calcestruzzo. Il valore della forza massima necessaria consente, attraverso delle curve sperimentali di correlazione, di pervenire al valore della R_{mc}.

La rottura della parte sottoposta a tensione avviene per compressione-taglio tra la parte allargata del tassello e la base del martinetto.

La strumentazione, oltre a comandare elettricamente il funzionamento del martinetto, consente una misura precisa della pressione oleodinamica, depurata degli attriti nella fase di taratura, e una stampa dei valori rilevati.

La procedura di prova può essere così sintetizzata:

- rilevazione attraverso un pacometro della presenza di ferri di armatura nell'area di prova;
- esecuzione del foro, alle distanza minima di 10 cm;
- perfetta pulizia del foro;
- inserimento del tassello con battitura della testa;
- fissaggio del martinetto di estrazione;
- estrazione comandata elettricamente;
- visione immediata e stampa del risultato.

La curva di correlazione tra forza massima d'estrazione e R_{mc} è ricavata da studi sperimentali di confronto con provini cubici:

$$R_c = 0{,}925 \cdot F + 9 \text{ [MPa]}$$

dove F è la forza di estrazione [kN].

Vanno eseguite almeno 3 estrazioni per ogni elemento strutturale utilizzando la media dei risultati ottenuti. Tutti i valori medi potranno concorrere a determinare la resistenza caratteristica R_{ck} definita come la resistenza a compressione al di sotto della quale si può attendere di trovare il 5% della popolazione di tutte le misure effettuate:

$$R_{ck} = R_{tm} - 1{,}64\ SQ$$

dove R_{tm} è il valore medio di tutti i risultati ed SQ è lo scarto quadratico.

I metodi di estrazione consistono nel misurare la forza necessaria per estrarre dal calcestruzzo degli inserti pre- o post-inseriti. L'estrazione viene effettuata utilizzando un anello di contrasto il cui diametro, in rapporto alla lunghezza dell'inserto, determina la rottura del conglomerato secondo una superficie troncoconica, con angolo di apertura α.

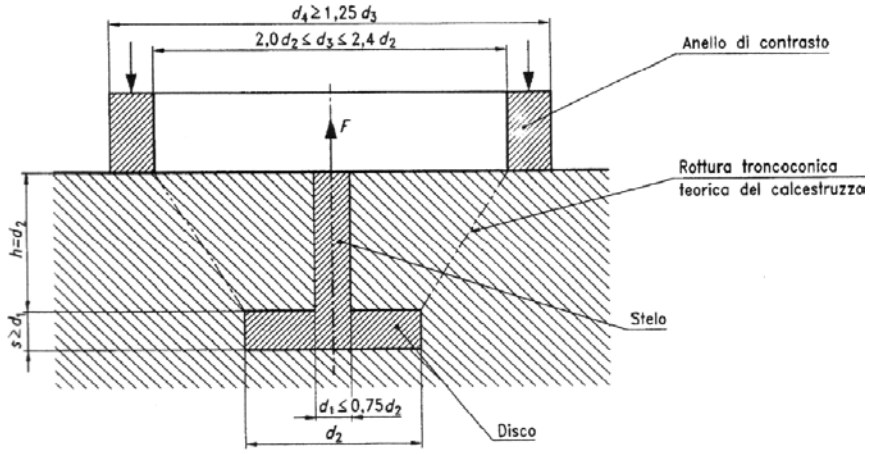


Figura 3.5. *Pull-out test*

Studi teorici e sperimentali, hanno mostrato che la forza di estrazione è correlata alla resistenza a compressione per angoli α fino a 30-35°; per α >45° è invece proporzionale alla resistenza a trazione.

3.12. Pull-out con inserti post-inseriti

Cut and pull-out test (UNI 10157) tassello inserito con particolare tecnica di fresatura tale da funzionare sostanzialmente per contrasto, analogamente al tassello preinglobato del *lok test*.

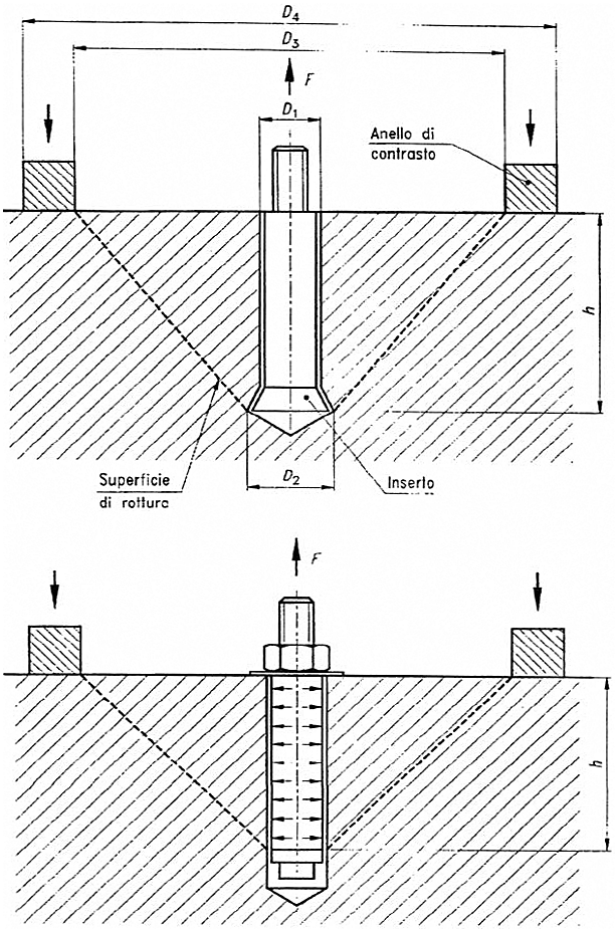


Figura 3.6. *Pull-out test con inserti*

3.13. Pull-off test

Si incolla un disco di acciaio alla superficie del calcestruzzo con resina epossidica. Si misura la forza di trazione che provoca la rottura. Può essere utile per verificare l'aderenza di ripristini superficiali con malte strutturali.

INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE INCLUSO

Note sul software incluso

Il software incluso[1] installa le seguenti utilità:

- **Fogli Excel per i controlli cls-acciaio e le prove sclerometriche**;
- **Check list e modelli di riferimento**:
  - Nomina del collaudatore statico da parte del committente;
  - Richiesta terna di nominativi per la scelta del collaudatore all'ordine provinciale degli architetti o degli ingegneri (art. 67, c. 4, D.P.R. 6 giugno 2001, n. 380);
  - Comunicazione di nomina del collaudatore statico tra la terna di nominati proposta dall'Ordine provinciale degli architetti o degli ingegneri (art. 67, c. 4, D.P.R. 6 giugno 2001, n. 380);
  - Accettazione dell'incarico di collaudo statico;
  - Relazione a strutture ultimate;
  - Collaudo statico delle strutture in calcestruzzo armato (Legge 5 novembre 1971, n. 1086, legge 2 febbraio 1974, n. 64, D.M. 14 gennaio 2008; legge regionale …);
  - Schema di certificato di collaudo statico – Lavori Pubblici;
  - Lettera di trasmissione dei provini in cls e barre di acciaio al laboratorio ufficiale prove;
  - Verbale di verifica delle tolleranze sulle masse e sulle sezioni dei tondini ad aderenza migliorata;
  - Richiesta al laboratorio ufficiale prove dell'esecuzione di prova di carico;
  - Certificato di idoneità sismica (ai sensi dell'art. 35, legge 28 febbraio 1985, n. 47 e della Legge 13 marzo 1988 e successive modifiche ed integrazioni);
  - Certificato di idoneità statica (ai sensi dell'art. 35, legge 28 febbraio 1985, n. 47 e della Legge 13 marzo 1988 e successive modifiche ed integrazioni);
  - Lettera di trasmissione provini per prove sui materiali impiegati;
  - Verbale di prelevamento campioni di calcestruzzo fresco;
  - Comunicazione all'Ufficio del Genio Civile di nomina del collaudatore;
  - Richiesta di conformità ai sensi dell'art. 28 della legge 2 febbraio 1974, n. 64;
  - Lettera di invito all'impresa appaltatrice della data di inizio del collaudo;
  - Lettera di incarico per collaudo in corso d'opera;
  - Lettera di incarico di collaudo;
  - Dichiarazione di accettazione di incarico di collaudo (art. 8 e 9 della L.R. 29 aprile 1985, n. 21);

[1] Il software incluso è parte integrante della presente pubblicazione e resterà disponibile nel menu **G-cloud** dell'area personale del sito **www.grafill.it**.

  - Lettera di avviso all'ingegnere capo della data di inizio del collaudo;
  - Invito all'appaltatore a firmare gli atti di collaudo (art. 112 del R.D. n. 350/1895);
  - Verbale di visita di collaudo in corso d'opera;
  - Verbale di collaudo provvisorio.
- **Glossario** (termini più ricorrenti sull'argomento);
- **FAQ** (risposte alle domande più frequenti);
- **Test base** / **Test avanzato** (verifiche sulla conoscenza dell'argomento).

Requisiti hardware e software

- Processore da 2.00 GHz;
- MS Windows Vista/7/8/10 (è necessario disporre dei privilegi di amministratore);
- MS .Net Framework 4 e vs. successive;
- 250 MB liberi sull'HDD;
- 2 GB di RAM;
- MS Word 2007 e vs. successive;
- MS Excel 2007 e vs. successive;
- Accesso ad internet e browser web.

Download del software e richiesta della password di attivazione

1) Collegarsi al seguente indirizzo internet:

   https://www.grafill.it/pass/0018_1.php

2) Inserire i codici "**A**" e "**B**" (vedi ultima pagina del volume) e cliccare **[Continua]**.
3) **Per utenti registrati** su www.grafill.it: inserire i dati di accesso e cliccare **[Accedi]**, accettare la licenza d'uso e cliccare **[Continua]**.
4) **Per utenti non registrati** su www.grafill.it: cliccare su **[Iscriviti]**, compilare il form di registrazione e cliccare **[Iscriviti]**, accettare la licenza d'uso e cliccare **[Continua]**.
5) Un **link per il download del software** e la **password di attivazione** saranno inviati, in tempo reale, all'indirizzo di posta elettronica inserito nel form di registrazione.

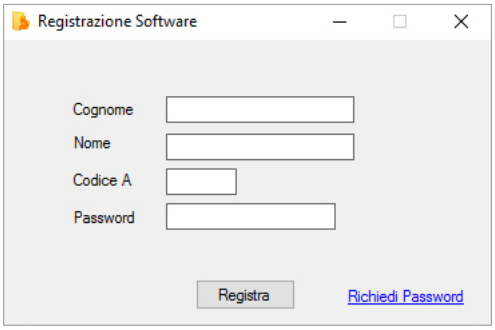
Installazione ed attivazione del software

1) Scaricare il setup del software (file *.exe) cliccando sul link ricevuto per e-mail.
2) Installare il software facendo doppio-click sul file **88-277-0019-8.exe**.
3) Avviare il software:

   Per utenti MS Windows Vista/7/8: **[Start]** › **[Tutti i programmi]** › **[Grafill]**
   › **[Prove diagnostiche su Edifici Esistenti]** (cartella)
   › **[Prove diagnostiche su Edifici Esistenti]** (icona di avvio)

   Per utenti MS Windows 10: **[Start]** › **[Tutte le app]** › **[Grafill]**
   › **[Prove diagnostiche su Edifici Esistenti]** (icona di avvio)

4) Compilare la maschera *Registrazione Software* e cliccare su **[Registra]**.



5) Dalla finestra *Starter* del software sarà possibile accedere ai documenti disponibili.

BIBLIOGRAFIA

- D.M. 17 gennaio 2018 – Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»
- Erion Lako – *Prove di carico statiche* – Marzo 2012
- Geoconsult s.r.l. – Schede Varie – Treviso 2015
- Giorgio Brunetti – Tecniche di indagine non distruttive e monitoraggio – Gennaio 2007
- Martinello Settimo – *Prove in sito* – Bologna 2016
- Tolve Rocco – *Normativa tecnica delle Costruzioni* – Ottobre 2011
- Venturi Vincenzo – *Manuale dei Controlli non Distruttivi* – Sidercem – Aprile 2012
- Vona Marco – *Riabilitazione Strutturale* – Settembre 2012
- Barbara De Nicolo – *Le tecniche non distruttive nella diagnostica dei ponti*
- Giovanni B. Fenelli – *Le indagini in sito: sondaggi campionamenti, prove e misure* – Giugno 2002

Il volume si configura come un manuale teorico-pratico per le tecniche diagnostiche e di indagine strumentale da eseguire su edifici esistenti ai sensi del **D.M. 17 gennaio 2018 (Norme Tecniche per le Costruzioni)**.
Le indagini diagnostiche sono strumenti potenti per la verifica di edifici nuovi, per le perizie tecniche tese ad individuare difetti di costruzione, e per gli interventi di adeguamento, miglioramento sismico di edifici esistenti e per il restauro di edifici storici. Nel manuale vengono analizzate, in dettaglio, le prove non distruttive e distruttive da poter eseguire sui diversi materiali da costruzione come calcestruzzo, acciaio, legno, muratura ed infine vengono affrontati gli argomenti legati alle prove sia geotecniche che strutturali da eseguire sulle strutture di fondazione.
Il manuale, organizzato in otto capitoli, tratta i seguenti argomenti:

– inquadramento normativo relativo alle nuove NTC 2018 con particolare riferimento alla valutazione della sicurezza e alla durabilità dei materiali;
– diagnostica, manutenzione e tecniche di monitoraggio e diagnostiche sia sui materiali che sulle analisi geotecniche;
– strutture in calcestruzzo e metodologie di prove non distruttive, distruttive e di monitoraggio strutturale;
– costruzioni in muratura e prove in sito e di laboratorio da eseguire su muratura portante;
– strutture in acciaio e prove diagnostiche e controlli che il professionista può eseguire su tali tipologie di strutture;
– il legno e controlli non distruttivi che il tecnico può effettuare sulle strutture lignee.
– analisi geotecnica per la corretta valutazione del modello geotecnico delle costruzioni esistenti;
– indagini sui ponti, e prove diagnostiche da eseguire sui ponti stradali e ferroviari.

Il manuale riporta una raccolta di modelli e check list di atti tecnici ed amministrativi quali verbali di visite in cantiere e relazioni utili per il professionista nello svolgimento dell'attività professionale, disponibili anche nel software incluso in formato editabile RTF.

NOTE SUL SOFTWARE INCLUSO

Il software incluso installa le seguenti utilità:

– Fogli Excel per i controlli cls-acciaio e le prove sclerometriche.
– Check list e modelli di riferimento.

L'installazione comprende: **Glossario** (termini più ricorrenti sull'argomento); **FAQ** (risposte alle domande più frequenti); **Test base** / **Test avanzato** (verifiche sulla conoscenza dell'argomento).

Requisiti hardware e software: Processore da 2.00 GHz; MS Windows Vista/7/8/10 (è necessario disporre dei privilegi di amministratore); MS .Net Framework 4 o vs. successive; 250 MB liberi sull'HDD; 2 GB di RAM; MS Word 2007 e vs. successive; MS Excel 2007 e vs. successive; Accesso ad internet e browser web.

Pietro Salomone, Ingegnere Civile, è specializzato in project management e gestione dei patrimoni edilizi. Lavora presso la P.A. nel settore della gestione dei processi manutentivi degli immobili. Collabora con riviste nazionali ed internazionali nella redazione di articoli tecnici e cura il blog Buildingmanagerstrategist che tratta tematiche di property management e gestione dei patrimoni immobiliari.

ISBN 13 978-88-277-0018-1

9 788827 700181 >

Euro 32,00