

LINEE GUIDA

REDAZIONE DEGLI ELABORATI TECNICI SULLA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA STATICA E VULNERABILITÀ SISMICA DELLE COSTRUZIONI ESISTENTI

Gruppo di lavoro

Massimo Baglione	Settore Sismica – Regione Toscana
Andrea Borghini	DICEA - UNIFI
Sonia Boschi	DICEA - UNIFI
Silvia Caprili	DICI - UNIFI
Franco Gallori	Settore Sismica – Regione Toscana
Francesco Morelli	DICI - UNIFI
Walter Salvatore	DICI – UNIFI
Andrea Vignoli	DICEA - UNIFI

Indice generale

1	Introduzione.....	3
1.1	Riferimenti normativi.....	3
2	La conoscenza della costruzione.....	4
2.1	Il percorso della conoscenza della costruzione.....	4
2.2	Analisi storico critica del fabbricato.....	5
2.3	Rilievo.....	5
2.3.1	<i>Rilievo geometrico-architettonico.....</i>	<i>6</i>
2.3.2	<i>Rilievo geometrico-strutturale.....</i>	<i>6</i>
1.1.1	<i>Rilievo del quadro fessurativo e dei dissesti.....</i>	<i>8</i>
2.3.3	<i>Definizione di eventuali carenze/situazioni critiche locali.....</i>	<i>8</i>
2.4	Progetto ed esecuzione del piano di indagini.....	8
2.4.1	<i>Indagini per la determinazione dei dettagli costruttivi (saggi in-situ).....</i>	<i>9</i>
2.4.2	<i>Indagini sperimentali per la caratterizzazione di materiali e strutture.....</i>	<i>14</i>
2.5	Caratterizzazione geologico-tecnica del sito.....	17
2.6	Relazioni tecniche ed elaborati sulla conoscenza.....	18
2.6.1	<i>Relazione tecnico-conoscitiva.....</i>	<i>18</i>
2.6.2	<i>Relazione geologica.....</i>	<i>19</i>
2.6.3	<i>Elaborati grafici.....</i>	<i>20</i>
3	Modellazione, analisi e verifiche di sicurezza.....	22
3.1	Valutazione delle azioni e loro combinazione.....	23
3.1.1	<i>Pesi propri permanenti e portati.....</i>	<i>23</i>
3.1.2	<i>Azioni variabili.....</i>	<i>23</i>
3.1.3	<i>Azione sismica.....</i>	<i>23</i>
3.1.4	<i>Combinazioni di carico.....</i>	<i>24</i>
3.2	Modellazione strutturale.....	24
3.2.1	<i>Modellazione meccanica dei materiali.....</i>	<i>24</i>
3.2.2	<i>Modellazione locale.....</i>	<i>25</i>
3.2.3	<i>Modellazione globale.....</i>	<i>25</i>
3.3	Analisi strutturale e valutazione della domanda.....	26
3.3.1	<i>Analisi locale.....</i>	<i>26</i>
3.3.2	<i>Analisi globale.....</i>	<i>27</i>
3.4	Valutazione della capacità e verifiche di sicurezza.....	27
3.5	Relazioni ed elaborati grafici.....	28
3.5.1	<i>Relazione sulla modellazione, analisi e verifica della costruzione.....</i>	<i>28</i>
3.5.2	<i>Relazione sulla modellazione sismica del terreno.....</i>	<i>31</i>
3.5.3	<i>Relazione sulle strutture di fondazione.....</i>	<i>31</i>
3.5.4	<i>Relazione geotecnica.....</i>	<i>31</i>
	Elenco degli elaborati.....	32

1 Introduzione

Il presente documento si configura quale linea guida di carattere generale ed orientativo per la definizione dei contenuti degli elaborati tecnici inerenti alla valutazione della sicurezza statica e vulnerabilità sismica di costruzioni esistenti. Il documento definisce quindi i contenuti essenziali e l'organizzazione generale delle relazioni e degli elaborati tecnici.

Le indicazioni provviste sono da considerarsi indicative ma non esaustive di tutte le possibili situazioni riscontrabili all'interno di un edificio esistente: caso per caso, sarà necessario specificare o dettagliare maggiormente gli aspetti inerenti alle fasi di conoscenza, modellazione, analisi e valutazione della sicurezza in funzione delle peculiarità riscontrate nel manufatto oggetto di interesse.

Il documento non è pertanto uno strumento atto ad individuare, definire e standardizzare la procedura; esso illustra quanto contenuto all'interno delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni) e della Circolare applicativa (Circolare n.7 del 21/01/2019 Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018), che rimangono gli unici riferimenti codificati per l'esecuzione delle valutazioni di sicurezza e vulnerabilità sul patrimonio edilizio esistente.

Le linee guida risultano quindi utile mezzo per la compilazione di relazioni tecniche complete, esaustive, chiare ed organizzate, capaci di permettere l'agevole riconoscimento delle scelte effettuate, delle tecniche di indagine impiegate, dei metodi di modellazione, analisi e verifica utilizzati, delle problematiche, carenze e criticità emerse per il manufatto considerato.

Il documento è organizzato in diversi capitoli. Dopo una breve introduzione, nel secondo capitolo sono illustrate le fasi del processo conoscitivo impiegato per giungere ad avere buona consapevolezza del manufatto esistente. Sono illustrate le principali tecniche di rilievo strutturale e di indagine diagnostica, nonché le più comuni metodologie di prova per la caratterizzazione meccanica dei materiali, ecc. Sono quindi fornite indicazioni relative ai contenuti della relazione 'tecnico-conoscitiva', attraverso la quale è possibile descrivere il fabbricato in tutte le sue componenti strutturali e non strutturali, e agli elaborati grafici che si possono redigere per sintetizzare i risultati del percorso conoscitivo.

Il terzo capitolo illustra le fasi di modellazione, analisi e valutazione della sicurezza della costruzione; sono fornite indicazioni in merito alla modellazione locale e globale delle costruzioni ed ai criteri di selezione della ottimale tecnica di analisi, funzione del livello di approfondimento conoscitivo raggiunto. Il documento suggerisce un efficace metodo di presentazione dei risultati, allineato con quanto previsto dalle attuali Norme Tecniche per le Costruzioni, permettendo l'individuazione delle criticità relative ad elementi strutturali, non strutturali ecc.

È infine fornito un utile elenco della documentazione da presentare, dei contenuti salienti delle varie relazioni tecniche e degli elaborati tecnici/grafici.

1.1 Riferimenti normativi

Il presente documento è stato redatto con riferimento a quanto riportato all'interno dei seguenti documenti tecnici:

- D.M. 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni, nel testo citate come NTC2018.
- Circolare n.7 del 21/01/2019 Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018.
- D.P.C.M. 9 febbraio 2011 "Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008", con specifico riferimento agli edifici di carattere storico-monumentale.

2 La conoscenza della costruzione

2.1 Il percorso della conoscenza della costruzione

Il percorso conoscitivo della costruzione è un processo complesso e multidisciplinare indispensabile per l'esecuzione di valutazioni di sicurezza statica e sismica di un manufatto esistente. Esso comprende attività diverse e strettamente interconnesse tra loro da eseguirsi con livelli successivi di approfondimento al fine di ottimizzare – sia in termini quantitativi sia in termini di costi e tempi – l'interazione diretta con il manufatto. Tali attività comprendono:

- a. l'analisi storico-critica del manufatto.
- b. Il rilievo (geometrico architettonico, geometrico-strutturale, dei dettagli costruttivi, del quadro fessurativo e dei dissesti).
- c. La caratterizzazione meccanica del materiale e degli elementi strutturali.
- d. La caratterizzazione geologico-tecnica del sito.

L'**analisi storico-critica** permette la ricostruzione del percorso morfologico-evolutivo del manufatto, tramite il reperimento di materiale documentario, relazioni tecniche, elaborati progettuali originari, ecc. Attraverso queste attività è possibile comprendere le trasformazioni e le modifiche che hanno portato l'edificio ad assumere la conformazione attuale.

Il **rilievo geometrico-architettonico** è necessario alla determinazione della geometria in pianta ed in elevazione del manufatto; può essere condotto ex-novo (in assenza di documentazione disponibile) o verificato in-situ a partire dalla documentazione reperita.

Il **rilievo-geometrico strutturale e dei dettagli costruttivi** è finalizzato alla definizione degli elementi costituenti ed alla ricostruzione dello schema strutturale del manufatto. Esso permette di individuare la geometria (i.e. dimensioni delle sezioni, luci e altezze) e i dettagli costruttivi degli elementi strutturali 'raggiungibili'. Il rilievo dei dettagli è esteso sia agli elementi strutturali sia a quelli non strutturali che possono interagire con essi (e.g. tamponature e tramezzi, impianti, ecc.). In presenza di edifici complessi o in aggregato, attraverso il rilievo geometrico-strutturale è possibile riconoscere le diverse unità strutturali ed i giunti tecnici e/o sismici che le separano.

Il **rilievo del quadro fessurativo e dei dissesti**, unitamente alle risultanze dei rilievi architettonico e strutturale e dell'analisi storico-critica, permette l'individuazione di eventuali cedimenti nel manufatto e nelle sue componenti, l'elaborazione di ipotesi sulla loro genesi e l'eventuale pianificazione e installazione di sistemi di monitoraggio, finalizzati a stabilire il progredire o la stabilizzazione dei dissesti presenti.

La **caratterizzazione meccanica** è necessaria per individuare valori di resistenza e deformabilità dei materiali costituenti l'edificio, da impiegare in sede di modellazione, analisi e valutazione di sicurezza, statica e sismica.

La **caratterizzazione geologico-tecnica del sito** prevede l'individuazione dei principali elementi stratigrafici, litologico-tecnici, geomorfologici e sismici del sito, mediante l'effettuazione di indagini specifiche o l'interpretazione critica di documentazione esistente.

Il percorso sopra sintetizzato è organizzato per **livelli progressivi di approfondimento di conoscenza, indagine e verifica**. Le informazioni sui dettagli costruttivi e sulle proprietà dei materiali si possono ricavare dall'esecuzione di campagne conoscitive successive, di volta in volta caratterizzate da maggior dettaglio, organizzate sulla base di una **verifica preliminare di sicurezza** che permette l'individuazione delle criticità e la messa a punto dei diversi piani di indagine.

A tal fine, il materiale originario di progetto, se presente, può essere riverificato in situ mediante saggi a campione finalizzati a valutare la rispondenza tra quanto ipotizzato in fase di progetto e quanto realizzato in fase di esecuzione. Qualora sia stata riscontrata buona rispondenza tra stato di progetto e stato di fatto, utilizzando le informazioni disponibili è possibile ricostruire un modello strutturale preliminare finalizzato all'esecuzione della valutazione preliminare della sicurezza.

Nel caso in cui la rispondenza tra stato di fatto e stato di progetto sia assente o parziale, le informazioni reperite possono ancora consentire l'effettuazione della valutazione di sicurezza preliminare basandosi sull'assunzione di schemi strutturali semplificati.

Infine, nel caso in cui non sia stato reperito il materiale originario di progetto (questo è generalmente il caso di edifici esistenti di muratura) o la rispondenza tra stato di fatto e stato di progetto sia assente o parziale, l'analisi della sicurezza statica e sismica è preceduta da una preventiva campagna conoscitiva 'diffusa' sull'intero manufatto, consistente in un numero limitato di indagini (preferibilmente non distruttive) su elementi strutturali e dettagli costruttivi. In tal modo è possibile effettuare analisi strutturali preliminari, anche locali o semplificate, che garantiscano il raggiungimento di risultati attendibili.

L'approccio conoscitivo prevede quindi l'approfondimento delle campagne di indagini sulla base dei risultati ottenuti dalle verifiche preliminari: in questo modo è possibile aumentare e dettagliare la conoscenza in maniera organica e critica, evitando quanto non strettamente necessario e ridondante, concentrandosi laddove necessario (ad esempio in corrispondenza delle zone in cui la domanda risulta essere più elevata).

L'approfondimento progressivo delle indagini garantisce l'elaborazione di modellazioni strutturali caratterizzate da crescente accuratezza e pertanto l'esecuzione di valutazioni di sicurezza più attendibili e meglio rappresentative del comportamento strutturale del manufatto, nonché l'impiego, opportunamente motivato da parte del tecnico incaricato, di fattori di confidenza via via minori.

Sulla base di quanto esposto, è possibile redigere una relazione descrittiva dell'opera che illustri il percorso conoscitivo seguito con riferimento all'analisi storico-critica, alle valutazioni numeriche preliminari eseguite sulla base delle informazioni possedute o delle indagini disponibili ed ai livelli progressivi di approfondimento di indagine, specificandone la progettazione ed illustrandone criticamente i risultati.

2.2 Analisi storico critica del fabbricato

L'edificio, allo stato di fatto, è il risultato di una serie di vicende e trasformazioni succedutesi nel tempo, la cui conoscenza aiuta ad interpretarne il comportamento strutturale statico e dinamico. L'analisi storico-critica è finalizzata alla ricostruzione del percorso morfologico-evolutivo del manufatto. Essa comprende l'individuazione delle modifiche e delle trasformazioni dovute a variazioni della destinazione funzionale e della distribuzione degli spazi interni, ad ampliamenti, sopraelevazioni, ecc. ed alle alterazioni operate dall'uomo con conseguenti modifiche dell'assetto statico originario di progetto.

Nell'ambito di suddetta analisi, è opportuno reperire ed analizzare criticamente i seguenti documenti e/o le informazioni disponibili; in particolare:

- documenti, relazioni tecniche ed elaborati progettuali risalenti al progetto ed alla realizzazione della costruzione;
- documentazione di collaudo;
- documenti, relazioni tecniche ed elaborati progettuali che attestano le modifiche effettuate nel corso degli anni;
- testimonianze relative agli eventi calamitosi (frane, terremoti, esplosioni, crolli, ecc.) che hanno colpito il manufatto e con eventuali dissesti, cedimenti, crolli, ecc.;
- progetti o testimonianze relative ad interventi di consolidamento strutturale eseguiti negli anni, anche a seguito degli eventi calamitosi di cui al punto precedente;
- fonti iconografiche e documentazione contabile;
- ogni altro documento disponibile sulle vicende del manufatto inerenti al comportamento strutturale.

In presenza di aggregati strutturali l'analisi storico-critica è anche finalizzata alla ricostruzione delle modifiche urbanistiche e territoriali che hanno influito sulla attuale conformazione dell'aggregato, tenendo presente annessioni, ampliamenti ecc.

Le informazioni ricavate dall'analisi storico-critica possono essere sintetizzate, oltre che in un apposito documento, mediante tavole grafiche raffiguranti – anche solo in modo qualitativo – le varie fasi del processo storico-evolutivo del manufatto.

2.3 Rilievo

Le attività di rilievo possono essere suddivise in tre categorie:

- Rilievo geometrico-architettonico.
- Rilievo geometrico-strutturale.

- Rilievo del quadro fessurativo e dei dissesti.

2.3.1 Rilievo geometrico-architettonico

Il rilievo geometrico-architettonico è finalizzato alla ricostruzione della geometria effettiva del manufatto, in termini di disposizione planimetrica degli elementi strutturali e non strutturali (e.g. tamponamenti e tramezzi, eventuali impianti significativi, ecc.) e loro organizzazione in elevazione.

Il materiale originario di progetto (e.g. piante, prospetti, sezioni risalenti all'epoca di realizzazione o a successive modifiche del fabbricato), se reperito, può costituire una base di partenza da riverificare in situ, individuando eventuali incongruenze, variazioni, modifiche planimetriche e di distribuzione degli spazi, ecc. Attraverso il rilievo architettonico si individuano eventuali irregolarità planimetriche e in elevazione, quali disallineamenti e fuori piombo, elementi in falso, ecc. Occorre inoltre individuare le destinazioni d'uso previste per i vari locali/aree del manufatto.

I risultati del rilievo geometrico-architettonico sono sintetizzati in tavole grafiche redatte - in scala adeguatamente leggibile in funzione delle dimensioni complessive dell'edificato considerato - contenenti piante, prospetti e sezioni rappresentative.

2.3.2 Rilievo geometrico-strutturale

Il rilievo geometrico-strutturale prevede, attraverso l'indagine anche visiva delle strutture e delle componenti non strutturali del manufatto, la ricostruzione della geometria della costruzione, della sua organizzazione strutturale, l'individuazione della geometria dei singoli elementi strutturali e dei loro dettagli costruttivi, la determinazione della tipologia dei materiali di cui essi sono composti e l'identificazione dei fenomeni di dissesto e di degrado e di qualunque fonte di vulnerabilità.

Il rilievo geometrico-strutturale del fabbricato include:

- la definizione della geometria degli elementi strutturali e dello schema strutturale;
- il rilievo dei dettagli costruttivi;
- il rilievo degli elementi non strutturali;
- l'individuazione di eventuali situazioni critiche locali.

2.3.2.1 Definizione della geometria degli elementi strutturali e dello schema strutturale

Il rilievo geometrico-strutturale comprende la definizione della geometria e della tipologia degli elementi strutturali e non strutturali al fine di ricostruire lo schema strutturale del manufatto.

Il rilievo geometrico-dimensionale degli elementi e delle loro sezioni deve essere il più possibile completo, estendendosi a tutte le porzioni del manufatto effettivamente raggiungibili. Le zone non direttamente rilevabili è necessario siano opportunamente indicate, facendo attenzione al fatto che la loro mancata conoscenza non influenzi in maniera significativa il risultato della valutazione di sicurezza.

Nel caso in cui sia presente il progetto strutturale originario, può essere sufficiente effettuare dei controlli a campione atti a verificare la corrispondenza tra lo stato di progetto ed il costruito.

Le attività da eseguire si differenziano lievemente in funzione della tipologia costruttiva del manufatto, sia esso con struttura di c.a. o di muratura.

Nel caso di costruzioni di c.a., fatto salvo il rilievo diretto degli elementi emergenti quali pilastri o travi ricalate, occorre eseguire preliminari indagini non distruttive (ad esempio termografie) per individuare la presenza di elementi in spessore di solaio, l'orditura degli orizzontamenti e quanto non direttamente rilevabile a vista.

Nel caso di costruzioni di muratura, sugli elementi strutturali (orizzontali e verticali) intonacati o non direttamente ispezionabili occorre eseguire indagini non distruttive (ad esempio termografie) per individuarne la dimensione, la tipologia e le principali caratteristiche della tessitura muraria nel paramento e, se possibile, nella sezione.

In presenza di complessi edificati o di aggregati strutturali, occorre individuare chiaramente i diversi corpi di fabbrica o unità strutturali che li costituiscono, rilevando la presenza di giunti tecnici/strutturali e riportandone, se note, la tipologia e la dimensione.

2.3.2.2 Rilievo dei dettagli costruttivi

Il rilievo dei dettagli costruttivi si esegue per livelli successivi di approfondimento su elementi opportunamente selezionati. Questo approccio permette di ottenere una migliore conoscenza in corrispondenza delle zone caratterizzate da maggiore criticità e maggiore incertezza, limitando al minimo l'impatto delle indagini in situ laddove non strettamente necessario.

Il rilievo dei dettagli costruttivi può essere eseguito 'a campione' su elementi strutturali ritenuti significativi ad esempio per tipologia, sezione, luce, ecc. Successive estensioni ad elementi analoghi per forma, disposizione, dimensioni, condizioni di carico e di vincolo possono essere effettuate sulla base di ipotesi ragionevolmente e adeguatamente giustificate dal tecnico incaricato, anche sulla base di modellazioni e verifiche preliminari di sicurezza.

Data la sostanziale differenza delle modalità di rilievo dei dettagli a seconda della tipologia strutturale, nel seguito si è distinto tra costruzioni di c.a. e costruzioni di muratura. In ogni caso, le indicazioni nel seguito riportate sono da considerarsi esplicative ma non esaustive di tutte le possibili situazioni riscontrabili all'interno di un edificio esistente; caso per caso, in relazione alle peculiarità rilevate, sarà opportuno dettagliare e approfondire determinati aspetti e/o criticità.

Costruzioni/elementi di c.a.

Nel caso delle costruzioni di c.a. il rilievo dei dettagli costruttivi comprende le attività finalizzate alla determinazione della tipologia, del numero, della dimensione e della disposizione delle armature longitudinali e trasversali e del loro stato di conservazione. È possibile sintetizzare le informazioni da reperire in quanto di seguito elencato (come già osservato, la lista di cui sotto non è esaustiva di tutte le possibili casistiche riscontrabili nei manufatti esistenti, da valutare pertanto ciascuno nella sua individualità):

- Tipologia di armatura: armature lisce o armature a aderenza migliorata.
- Dimensione: diametro delle armature longitudinali e trasversali.
- Disposizione delle armature: quantitativi di armatura longitudinale e trasversale, schema in sezione di travi, pilastri, setti e strutture di fondazione, passo delle staffe nelle varie sezioni significative, chiusura delle staffe, presenza e disposizione dei ferri piegati, lunghezze di ancoraggio, ecc. Laddove possibile, disposizione delle armature longitudinali e delle staffe in corrispondenza dei nodi trave-colonna.
- Dimensione del copriferro in corrispondenza delle diverse sezioni significative.
- Stato di conservazione delle armature: presenza di fenomeni di corrosione diffusa o localizzata delle armature longitudinali e trasversali con specifica indicazione della posizione e dell'estensione nelle diverse sezioni/porzioni significative degli elementi strutturali.

Le informazioni sui dettagli costruttivi sopra riportate possono essere reperite dalla documentazione originaria di progetto, se presente, o mediante l'esecuzione di un progetto simulato, basate sulle prescrizioni normative vigenti all'epoca di realizzazione del fabbricato.

In entrambi i casi occorre verificare le informazioni desunte tramite l'esecuzione di indagini e rilievi in situ, in maniera più o meno diffusa in funzione degli elementi acquisiti e della corrispondenza riscontrata; qualora non sia presente documentazione di riferimento, è opportuno procedere con indagini maggiormente diffuse sul manufatto.

Costruzioni/elementi di muratura

Nel caso delle costruzioni di muratura, il rilievo dei dettagli costruttivi comprende le attività finalizzate alla determinazione delle maggiori caratteristiche qualitative della tessitura muraria (nel paramento e nella sezione) e la presenza dei collegamenti tra gli elementi strutturali.

È possibile sintetizzare le informazioni da reperire in quanto di seguito riportato (come già osservato per le costruzioni di c.a., la lista di cui sotto non è esaustiva di tutte le possibili casistiche riscontrabili, da valutare pertanto caso per caso nella loro peculiarità):

- Tipologia della muratura (tessitura muraria, tipo di blocchi e malta; tipologia di paramento – singolo, doppio, ecc., con o senza riempimento a sacco, con o senza collegamenti trasversali, ecc.).
- Presenza e tipologia/qualità del sistema di collegamento tra gli elementi murari (ad esempio presenza di ammorsamenti murari tra pareti ortogonali, presenza di cantonali, ecc.).
- Presenza e tipologia/qualità di collegamenti tra elementi murari e orizzontamenti e coperture (ad esempio, cordoli di piano in calcestruzzo, muratura o altro materiale).

- Presenza di architravi strutturalmente efficienti al di sopra delle aperture, individuandone tipologia e materiale.
- Presenza di sistemi atti al contenimento delle spinte orizzontali quali incatenamenti (siano essi lignei, metallici o di altro materiale).
- Tipologia di sistemi di appoggio degli orizzontamenti sulle murature verticali (indicazione della lunghezza dell'appoggio, laddove possibile, e presenza di elementi di ripartizione dei carichi).

2.3.2.3 Rilievo degli elementi non strutturali

Il rilievo delle componenti non strutturali (siano essi tamponamenti, tramezzi, impianti, macchine quali pompe di calore, ecc.) è necessario al fine di permetterne il posizionamento e la definizione tipologica all'interno del manufatto, di determinarne le caratteristiche geometriche e dimensionali, il materiale, il peso, il tipo, l'efficacia del collegamento (eventuale) con le strutture portanti e l'eventuale interazione strutturale con esse.

Occorre inoltre evidenziare le interferenze impianti-strutture, documentate anche tramite il ricorso ad apposita documentazione fotografica; eventuali passaggi orizzontali e verticali (canne fumarie, tubazioni del riscaldamento, scarichi e adduzioni idriche, condotte elettriche, etc.) nelle strutture portanti o di controvento, nei solai e nelle cassette esterne è opportuno siano specificamente individuati e localizzati.

1.1.1 Rilievo del quadro fessurativo e dei dissesti

Il quadro fessurativo è l'insieme delle lesioni e delle fessure presenti sulla costruzione, dovute a carenze del sistema strutturale o dipendenti da azioni/eventi esterni. La valutazione e l'analisi del quadro fessurativo sono propedeutiche alla definizione del sistema resistente e possono contribuire a riconoscerne il comportamento, ad individuare eventuali situazioni critiche locali e ad individuare potenziali elementi di vulnerabilità.

Il rilievo e la rappresentazione del quadro fessurativo e dei dissesti, eseguiti in modo completo e puntuale per le varie componenti strutturali e non strutturali del manufatto (elementi verticali, orizzontamenti, ecc.) e classificando le tipologie di lesioni presenti e la loro entità, permettono di comprendere la presenza di problematiche – in atto o stabilizzate – nell'edificio. Le cause delle lesioni/dissesti possono, talvolta, essere individuate correlando quanto rilevato in situ con i risultati dell'analisi storico-critica. Nel caso di fenomeni in atto occorre valutare la possibilità di verificarne l'evoluzione mediante appositi sistemi di monitoraggio.

2.3.3 Definizione di eventuali carenze/situazioni critiche locali

La presenza di eventuali carenze/situazioni critiche locali legate sia agli elementi strutturali sia agli elementi non strutturali (e.g. presenza di pilastri in falso per strutture in c.a., presenza di pareti di grande specchiatura e prive di ritegni per gli edifici in muratura, tamponature/tramezzi di ampia specchiatura e privi di idonei collegamenti alle strutture adiacenti, elementi in falso in corrispondenza di orizzontamenti, ecc.) è necessario sia opportunamente specificata e, laddove necessario, rappresentata mediante appositi elaborati grafici.

2.4 Progetto ed esecuzione del piano di indagini

Le campagne conoscitive delle componenti strutturali e non strutturali sono finalizzate alla ricostruzione dei dettagli costruttivi ed alla caratterizzazione meccanica sperimentale dei materiali e delle strutture sulla base dei risultati dell'analisi storico-critica e del rilievo geometrico e strutturale.

Anche in presenza di documentazione originaria di progetto sono necessarie indagini per verificare ed integrare le informazioni possedute. In particolare, si individuano:

- saggi in situ sugli elementi strutturali e non strutturali;
- prove sperimentali per la determinazione delle proprietà meccaniche dei materiali e delle strutture.

Come più volte accennato, le campagne conoscitive sono organizzate per livelli successivi di approfondimento:

- il primo livello di indagine è mirato al reperimento delle informazioni sufficienti all'esecuzione di una valutazione di sicurezza preliminare sulla costruzione, che permetta di individuare le zone affette da maggiori problematiche, maggiormente sollecitate, o altresì meno conosciute.
- I livelli successivi di indagine sono 'calibrati' sui risultati delle verifiche precedenti, permettendo di ottimizzare la conoscenza e, conseguentemente, di elaborare di modellazioni via via più raffinate e che garantiscono una maggiore attendibilità dei risultati.

È necessario che le campagne di indagine siano programmate adeguatamente; ad esempio, per ciascuna campagna conoscitiva e per ciascuno degli impalcati interessati, può essere redatta una pianta che riporti, in scala opportuna, la localizzazione di tutti gli elementi soggetti a indagine. A ciascun elemento indagato occorre associare un codice identificativo alfanumerico univoco che ne permetta l'esatta individuazione nel manufatto e la successiva classificazione.

All'interno della relazione tecnica si possono riportare i seguenti elaborati:

- una pianta per ciascun impalcato interessato con identificazione degli elementi da indagare ai fini della determinazione dei dettagli costruttivi (**pianta dei saggi in situ**);
- una pianta per ciascun impalcato interessato con identificazione degli elementi da sottoporre a prove meccaniche per la caratterizzazione del materiale (**pianta delle prove**).

La valutazione critica dei risultati ottenuti da ciascun livello di approfondimento di conoscenza/indagine effettuato, in riferimento alla tipologia di materiale ed alle relative caratteristiche meccaniche ipotizzate per l'elemento considerato, permette l'aggiornamento e l'integrazione delle campagne sperimentali.

Le indicazioni di seguito riportate costituiscono un valido esempio delle indagini che possono essere eseguite in situ sugli elementi strutturali (siano essi di c.a., muratura o altro); ovviamente, le informazioni di seguito riportate non sono esaustive di tutti i casi particolari che si possono riscontrare nella pratica professionale, da valutarsi pertanto in riferimento a ciascuna specifica situazione.

2.4.1 Indagini per la determinazione dei dettagli costruttivi (saggi in-situ)

Costruzioni di calcestruzzo armato

I saggi in-situ finalizzati alla definizione dei dettagli costruttivi si eseguono su una congrua percentuale di elementi strutturali e non strutturali, privilegiando quelli provvisti di un ruolo di primaria importanza nella struttura.

Il quantitativo di saggi in-situ dipende dal grado di conoscenza della struttura che si vuole raggiungere, tenendo presente le informazioni effettivamente possedute al momento in cui si intraprendono le operazioni di rilievo, modellazione, analisi e valutazione della sicurezza.

La circolare applicativa alle Norme Tecniche per le Costruzioni (circ. 7/2019) individua tre livelli di approfondimento diverso per lo svolgimento delle indagini. Nello specifico:

- a. Indagini limitate. Consentono di valutare, mediante saggi 'a campione', la corrispondenza tra quanto riportato nei disegni costruttivi (o ipotizzato attraverso il progetto simulato) e quanto presente in situ. Le indagini si eseguono su un numero *limitato* di elementi strutturali e non strutturali, opportunamente selezionati.
- b. Indagini estese. Quando non sono disponibili i disegni costruttivi originali o quando le informazioni sono comunque insufficienti e/o incomplete, al fine di ottenere una conoscenza diffusa sul manufatto che sia comunque sufficiente all'esecuzione di valutazioni di sicurezza preliminare, si eseguono saggi in situ su un numero maggiore di elementi.
- c. Indagini esaustive. Si effettua quando si desidera raggiungere un accurato livello di approfondimento conoscitivo sul manufatto o su porzioni significative di esso e non sono disponibili gli elaborati progettuali originari. Si esegue, ad esempio, come 'fase successiva di approfondimento' in corrispondenza delle zone affette da maggiori criticità o sulle quali persistono maggiori incertezze.

A titolo esclusivamente orientativo, nelle tabelle C8.5.V e C8.5.VI della Circ.7/2019 applicativa alle NTC2018 si lega il livello delle indagini (limitato, esteso, esaustivo) alla quantità di rilievi dei dettagli costruttivi e di prove da effettuarsi per la valutazione delle caratteristiche meccaniche

dei materiali. In particolare, per quanto riguarda i dettagli costruttivi, la quantità e disposizione dell'armatura devono essere verificate per almeno il **15%, 35% e 50%** degli elementi primari.

Nel computo delle percentuali di elementi indagati, per il rilievo dei dettagli costruttivi, si tiene conto delle eventuali situazioni ripetitive che consentano di estendere i controlli effettuati su alcuni elementi strutturali ad elementi con evidenti caratteristiche di ripetibilità, per geometria e ruolo uguali nello schema strutturale.

Le percentuali degli elementi indagati sono da considerarsi puramente indicative: esse forniscono una 'densità' media del quantitativo di saggi da effettuare in relazione al totale degli elementi strutturali del manufatto. Il numero complessivo e la localizzazione delle indagini sugli elementi sono calibrati dal tecnico incaricato in relazione alle informazioni reperite sul manufatto ed ai risultati ottenuti dalle eventuali valutazioni preliminari della sicurezza. I valori indicativi della circolare possono pertanto essere 'modulati' in virtù del livello di conoscenza che si vuole raggiungere e di quanto già si conosce, al fine di impattare il meno possibile con il manufatto evitando di ottenere informazioni ridondanti e sovrabbondanti laddove non strettamente necessario.

Nei casi indicati alle lettere (a) e (b), le informazioni reperite possono essere impiegate per l'esecuzione delle valutazioni preliminari di sicurezza sul manufatto, permettendo di individuare le zone affette da maggiori criticità e/o scarsa conoscenza, sulle quali concentrare i successivi approfondimenti. I saggi di cui al punto (c) consentono di elaborare modellazioni più raffinate e verifiche di sicurezza conseguentemente più accurate.

In ogni caso è necessario che il tecnico incaricato espliciti in modo chiaro e fornisca adeguate motivazioni riguardo il quantitativo di indagini pianificate ed il loro posizionamento nel manufatto; in relazione delle necessità di volta in volta riscontrate sullo stesso elemento strutturale e/o sulla medesima sottostruttura si possono raggiungere diversi livelli di approfondimento della conoscenza, ai quali corrisponderanno – nel caso – diversi fattori di confidenza da applicare in fase di esecuzione delle verifiche di sicurezza.

Per quanto riguarda le costruzioni di c.a., per la localizzazione e l'esecuzione delle indagini sui dettagli costruttivi si possono seguire le indicazioni sotto riportate, da considerarsi orientative e comunque non esaustive di tutte le possibili situazioni. Caso per caso, è necessario che il tecnico incaricato valuti l'applicabilità e l'estensione delle indagini.

➤ **Saggi in-situ sugli elementi strutturali tipo trave**

Le indicazioni di seguito riportate costituiscono un valido esempio delle indagini che possono essere eseguite in situ sugli elementi strutturali di c.a.

Armature longitudinali. I saggi si eseguono (in generale) in corrispondenza dell'intradosso della sezione di mezzera e all'estradosso delle sezioni di appoggio. Le altre sezioni potenzialmente critiche (es. appoggi intermedi, sezioni sottoposte a carichi concentrati ecc.) occorre altresì siano tenute in considerazione ed indagate. I saggi sono finalizzati ad individuare: i quantitativi di armatura longitudinale, la tipologia di armatura (liscia o a aderenza migliorata), i diversi diametri presenti, lo stato di degrado/conservazione in cui vertono le armature medesime.

Il quantitativo e la disposizione delle armature longitudinali all'intradosso degli elementi trave possono essere individuati, ad esempio, mediante la preventiva esecuzione di indagini pacometriche. Nel caso di elementi in spessore di solaio o con sottostante tamponatura, è necessario rimuovere porzioni limitate di tamponamento.

La misurazione dell'effettivo diametro delle armature longitudinali e trasversali può essere effettuata mediante rimozione del copriferro, possibilmente in corrispondenza dell'aggancio tra armatura longitudinale e staffe trasversali o con indagini pacometriche.

La disposizione delle armature longitudinali all'estradosso può essere rilevata mediante rimozione del pavimento e degli strati di riempimento dei solai sovrastanti le travi. La rimozione del pavimento permette al contempo di determinare lo spessore della eventuale soletta del solaio e la presenza di eventuale armatura (rete elettrosaldata o armature trasversali all'orditura del solaio).

Nella localizzazione dei punti nei quali effettuare la demolizione della pavimentazione è necessario tenere conto delle esigenze pratiche e di sicurezza degli eventuali utenti del manufatto.

Armature trasversali. Le indagini finalizzate alla determinazione della posizione delle armature trasversali si possono eseguire in maniera diffusa e poco invasiva sui diversi elementi strutturali selezionati mediante pacometro, individuando il passo delle staffe lungo tutta la luce della trave (laddove possibile). La presenza di armatura sagomata ("ferri piegati") può essere verificata o

tramite saggi all'estradosso (e.g. tramite rimozione della pavimentazione) oppure tramite indagini tipo non distruttivo (ad esempio mediante georadar). Per la determinazione del diametro delle armature trasversali, si seguono le indicazioni già specificate per le armature longitudinali.

➤ **Saggi in-situ sugli elementi strutturali tipo pilastro**

Armature longitudinali e trasversali. Indagini pacometriche estese a tutta la altezza del pilastro ed effettuate in corrispondenza di tutte e quattro le facce dell'elemento strutturale si possono eseguire al fine di individuare la disposizione delle armature longitudinali e il passo delle staffe trasversali e, laddove possibile in relazione alle caratteristiche dello strumento impiegato ed all'attendibilità dei risultati ottenuti, il diametro delle armature. La misurazione diretta del diametro delle barre e delle staffe può essere effettuata rimuovendo una porzione di copriferro possibilmente in corrispondenza delle zone di connessione barra/staffa. In generale, valgono considerazioni riportate per le travi.

➤ **Saggi in-situ sui nodi trave-colonna**

Armature longitudinali e trasversali. Indagini pacometriche estese a tutta la altezza del nodo permettono di individuare la disposizione delle armature longitudinali e il passo delle staffe trasversali (laddove possibile).

➤ **Saggi in-situ sugli orizzontamenti piani**

Le indagini sugli orizzontamenti di piano ed eventualmente di copertura si effettuano, in generale, tenendo conto delle analogie di altezza, dimensione, carico, ecc. al fine di ottimizzarne il numero e la localizzazione. Le indagini sugli orizzontamenti perseguono i seguenti obiettivi:

- determinazione della tipologia, della dimensione e della disposizione degli elementi portanti del solaio, siano essi elementi in laterizio armato, in calcestruzzo normale o precompresso, in acciaio o in legno.
- Determinazione della dimensione e della disposizione dell'armatura longitudinale (nel caso di solai con elementi in laterizio armato, in calcestruzzo armato normale o precompresso) e dell'eventuale rete elettrosaldata.
- Determinazione della tipologia, della dimensione e del peso degli elementi di alleggerimento (nel caso di solai in laterizio armato o in laterocemento).
- Determinazione della tipologia, della dimensione e dello spessore della lamiera grecata (nel caso di solai in acciaio) e della tipologia, disposizione e numero dei connettori.
- Determinazione degli spessori dei vari strati di riempimento presenti all'estradosso del solaio (e.g. soletta, massetti, sottofondi, pavimentazioni, ecc.) ed alla stima dei corrispondenti pesi.
- Determinazione dello spessore dello strato di intonaco presente all'intradosso del solaio.
- Determinazione della tipologia, dell'orditura e dello spessore del tavolato sovrastante l'orditura primaria o secondaria nel caso di elementi in legno.
- Determinazione della tipologia di connettori presenti tra elementi primari e secondari e con il tavolato sovrastante nel caso di orizzontamenti in legno. Eventuali irregolarità nella tipologia di collegamento (ad esempio nel caso di zeppe di riempimento o simili) è necessario siano opportunamente annotate e segnalate.
- Determinazione dello stato di eventuale degrado (se visibile) degli elementi strutturali (soprattutto nel caso di elementi in legno).
- Valutazione della presenza di evidenti inflessioni (stato deformativo presente, in atto e/consolidato).

Le attività di cui ai punti (a), (b), (c), (d) ed (f) sono solitamente eseguite all'intradosso del solaio; per esse è sufficiente la rimozione di eventuali controsoffitti o dello strato di intonaco che 'nasconde' alla vista l'orditura e la disposizione degli elementi.

Le operazioni di cui al punto (e) sono eseguite all'estradosso del solaio, mediante rimozione di una porzione di pavimentazione e degli strati sottostanti e misurazione del loro spessore. Nel caso in cui le operazioni di cui al punto (e) evidenzino la presenza di strati di riempimento di spessore significativo, anche associato a cambiamenti di quota del piano di calpestio, è consigliabile rimuovere un volume rappresentativo del riempimento in modo da poter stimare con maggiore esattezza il peso specifico del materiale presente, al fine di una più accurata valutazione dei carichi gravanti sull'orizzontamento stesso e sulle pareti.

➤ **Saggi in-situ sulle strutture di fondazione**

Le indagini sulle strutture di fondazione hanno l'obiettivo di determinarne la tipologia (e.g. fondazione superficiale o fondazione profonda), la forma, la dimensione e la profondità, la quota di imposta, nonché, laddove possibile, l'armatura. Le indagini sulle strutture di fondazione possono essere, ad esempio, effettuate mediante micro-carotaggi a diverse inclinazioni che permettono di ricostruire il profilo della sezione e la profondità del piano di posa nonché mediante tecniche tipo georadar.

Laddove non si riscontrino evidenti segni di cedimento in corrispondenza delle strutture di fondazione, la verifica delle fondazioni – conformemente a quanto specificato in normativa – non è obbligatoria, e con essa non sono obbligatorie le indagini finalizzate alla loro caratterizzazione geometrico-strutturale.

Tali operazioni si rendono altresì necessarie qualora, a seguito di interventi, si riscontrino modifiche sostanziali dei carichi gravanti in fondazione che richiedono adeguate verifiche per raggiungere un buon livello di conoscenza sulle strutture in esame.

➤ **Saggi in situ sugli elementi non strutturali**

Le indagini sugli elementi non strutturali hanno l'obiettivo di determinarne la tipologia, la forma, la dimensione, il corrispondente peso e, laddove possibile, la modalità di interazione e/o connessione con le strutture portanti verticali. Le informazioni da reperire sono riportate di seguito in maniera esemplificativa, ma non esaustiva di tutte le possibili casistiche. Ulteriori peculiarità e specificità riscontrate andranno, caso per caso, opportunamente indagate.

- Esecuzione di saggi consistenti nella rimozione di intonaco dalle pareti di tamponamento interne o esterne finalizzate a verificare la tipologia di elemento non strutturale impiegato (es. laterizi pieni, semipieni o forati, blocchi di cls alleggerito, pietra ecc.).
- Esecuzione di indagini endoscopiche finalizzate ad appurare lo spessore e la stratigrafia delle pareti di tamponamento (ad esempio individuare la presenza di intercapedini, cavità, ecc.) e l'eventuale collegamento tra paramenti diversi.
- Esecuzione di indagini mirate ad individuare l'assenza o la presenza di connessioni specifiche tra le pareti di tamponamento e la struttura portante (ad esempio, nel caso di pannelli di tamponamento prefabbricati, verificare la presenza di staffe di ancoraggio in corrispondenza della sommità del tamponamento e degli elementi del telaio circostante, ecc.).
- Esecuzione di indagini finalizzate ad individuare la tipologia, il peso ed il tipo di collegamento alla struttura portante di eventuali elementi di controsoffitto.
- Esecuzione di indagini finalizzate alla stima dei pesi degli impianti presenti ed alla tipologia di collegamento con la struttura portante orizzontale (e.g. orizzontamenti) o verticale.
- Esecuzione di indagini finalizzate alla valutazione della tipologia, del peso, dello stato di conservazione e della modalità di collegamento alla struttura portante di cornicioni, parapetti, cornici, eventuali elementi decorativi, gronde, comignoli, canne fumarie, pavimenti galleggianti, elementi illuminanti, ecc.

Costruzioni di muratura

A causa della grande variabilità delle tecniche costruttive impiegate e delle tipologie di materiale presente, il rilievo dei dettagli costruttivi risulta fondamentale per comprendere il funzionamento strutturale della costruzione o delle sue parti, derivante, ad esempio, dalla presenza o dall'assenza di adeguati collegamenti a livello di orizzontamento, di copertura, tra pareti ortogonali ecc.

Analogamente a quanto detto in precedenza per le costruzioni di c.a. il numero e la disposizione dei saggi in-situ è funzione del livello di approfondimento che si vuole raggiungere e di quanto già si conosce la costruzione al momento in cui si iniziano rilievo geometrico-strutturale, modellazione, analisi e valutazione della sicurezza.

La Circ. 7/2019 applicativa alle NTC2018 individua tre livelli di approfondimento diverso per lo svolgimento delle indagini. Nello specifico:

- a. **Indagini limitate:** indagini di tipo visivo comprensive di rilievo geometrico delle superfici esterne e di saggi finalizzati a determinare la tipologia della tessitura muraria, la tipologia del paramento (singolo, doppio, ecc.), il tipo di connessione tra pareti e tra pareti e orizzontamenti, ecc.

- b. **Indagini estese:** le operazioni indicate al punto precedente sono accompagnate da saggi più estesi e diffusi così da ottenere tipizzazioni delle caratteristiche dei materiali e costruttive.
- c. **Indagini esaustive:** le indagini di cui ai punti precedenti sono estese sistematicamente (con saggi in situ) alle varie pareti al fine di ottenere informazioni chiare sulla tipologia e sulla qualità delle murature, sui collegamenti parete/parete e parete/orizzontamenti, sulla presenza di catene e/o tiranti, ecc.

Per le costruzioni di muratura, relativamente ai saggi in-situ finalizzati alla definizione dei dettagli costruttivi, si possono prevedere le seguenti attività. Anche in questo caso, le informazioni e le metodologie di seguito riportate sono da considerarsi esemplificative ma non esaustive di tutte le specifiche situazioni, da analizzarsi pertanto caso per caso.

➤ **Saggi in situ sulle strutture verticali.**

Tipologia di tessitura muraria nel paramento. I saggi per la valutazione della tipologia di tessitura muraria prevedono la rimozione di intonaco in porzioni di parete di almeno 1×1 m o, altresì, di grandezza sufficiente per definire in modo completo la tessitura della superficie muraria mediante indagine visiva. Qualora si preveda la presenza, lungo l'altezza della parete considerata, di listature e/o ricorsi, i saggi saranno estesi in modo tale da permetterne l'individuazione dell'interasse. Le attività prevedono inoltre l'individuazione della apparecchiatura muraria nel paramento e nella sezione muraria (intesa come disposizione dei diversi elementi nella compagine muraria a formarne la struttura tridimensionale e come valutazione della sua compattezza).

Qualora, ad esempio dall'analisi storico-critica o dall'interpretazione critica del rilievo e della documentazione, si ipotizzi la presenza di cavedi, nicchie, aperture preesistenti, canne fumarie, ecc. successivamente tamponate a seguito di modifiche architettonico-funzionali ai vari livelli del fabbricato, si possono eseguire indagini mirate sulle pareti finalizzate a localizzare la posizione, la natura e l'eventuale ammorsamento delle tamponature.

Tipologia di paramento nella sezione. I saggi per la determinazione del tipo di paramento murario sono finalizzati a valutare se la muratura è costituita da un unico paramento, due o più paramenti, ecc. e si eseguono mediante endoscopia o micro-carotaggi nello spessore murario. Nel caso in cui la parete sia costituita da più paramenti, occorre determinare il grado di connessione dei paramenti stessi.

Caratterizzazione della qualità della muratura. Le attività di rilievo sono finalizzate alla individuazione ed alla caratterizzazione qualitativa dei materiali costituenti la muratura, ovvero:

- individuazione del tipo di blocco/elemento, della sua forma/lavorazione, delle dimensioni e della provenienza (esempio: per una muratura in pietra specificare se questa è costituita da ciottoli arrotondati di fiume di piccole o medie dimensioni, conci sbazzati di arenaria da scavo o cava, ecc.).
- Indicazione del tipo malta e delle sue maggiori caratteristiche: spessore dei giunti presenti sul paramento e sua omogeneità (ad esempio individuazione di presenza di zone dilavate) valutazione della dimensione, orizzontalità, regolarità e sfalsamento dei giunti di malta. Valutazione della presenza di malta di riempimento nei giunti verticali. Individuazione del tipo di legante, del tipo di aggregato e del rapporto legante/aggregato della malta.
- Compilazione della Scheda di Qualità Muraria e valutazione dell'Indice di Qualità Muraria (a tal fine di può ricorrere a quanto riportato al sito
- Valutazione dello stato di conservazione della muratura.

Collegamenti. Le indagini per la determinazione dei collegamenti sono finalizzate a:

- individuare il grado di ammorsamento tra pareti ortogonali e tra pareti e strutture orizzontali, mediante saggi opportunamente localizzati consistenti in rimozioni di intonaco, endoscopie localizzate ecc.
- Individuare gli eventuali dispositivi di collegamento tra gli elementi strutturali (cordoli, controventamenti, ecc.) e i sistemi finalizzati all'eliminazione delle spinte orizzontali (catene, cordoli, ecc.). Nel caso in cui si rilevi la presenza di catene e/o tiranti, occorre indicare la posizione in pianta e in elevato al fine di permettere la valutazione della loro efficacia, funzione – oltre che del posizionamento – della tipologia del sistema di ancoraggio (capochiave, paletto, piastra, catena annegata, ecc.).

➤ **Saggi in situ sulle strutture orizzontali**

Le indagini sulle strutture di orizzontamento e/o di copertura prevedono, in generale, l'esecuzione di saggi non passanti o passanti (a seconda delle necessità) tesi all'individuazione di tutte le tipologie di orizzontamenti presenti nell'edificio (in legno, in latero-cemento, in acciaio, misti, ecc.) e dello spessore e peso del pacchetto strutturale e non strutturale (e.g. individuazione dei materiali e degli spessori per l'individuazione dei carichi agenti, stratigrafia) nonché di eventuali fenomeni di degrado (soprattutto nel caso di orizzontamenti in legno e/o in acciaio) e di cedimento (ad esempio presenza di notevoli e significative inflessioni degli elementi strutturali primari o secondari ecc.).

Le indagini sugli orizzontamenti piani possono seguire le indicazioni già fornite ai paragrafi precedenti per quanto riguarda le strutture di c.a., facendo particolare attenzione all'individuazione della tipologia e delle caratteristiche dei sistemi di appoggio degli orizzontamenti sulle strutture verticali portanti.

Nelle costruzioni di muratura e, soprattutto nel caso dei manufatti di rilevanza storico-architettonica, è frequente la presenza di strutture voltate di diverso genere, da indagare opportunamente. I saggi sulle strutture di orizzontamento voltato sono finalizzati a:

- Determinare lo spessore strutturale della volta in tutte le sezioni ritenute significative (chiave, reni, ecc.).
- Effettuare un accurato rilievo del profilo all'intradosso della volta (in modo da capire se sono presenti cedimenti o perdite di forma in atto).
- Determinare lo spessore e la tessitura della struttura portante della volta (es. elementi di laterizio disposti in folio o in coltello, elementi di pietra con disposizione non regolare ecc.)
- Determinare lo spessore ed il peso specifico del riempimento non strutturale della volta, ad esempio mediante l'esecuzione di indagini endoscopiche e prelievo di porzioni del riempimento.
- Determinare lo spessore e la tipologia degli strati di riempimento sovrastanti (e.g. massetti, sottofondi di pavimentazione, pavimentazione, ecc.).
- Determinare la tipologia di legno presente, la presenza di difetti (nodi, gruppi di nodi, intagli, ecc.), la classe di resistenza e lo stato di conservazione degli elementi di legno.

➤ **Saggi in situ sulle strutture di fondazione**

Le indagini sulle strutture di fondazione sono finalizzate a determinarne la tipologia (e.g. superficiale o fondazione profonda), la forma, la dimensione e la profondità, nonché, laddove possibile in presenza di fondazioni di calcestruzzo armato, l'armatura. Le indagini permettono inoltre di rilevare la quota di imposta da impiegarsi per la modellazione strutturale e la successiva analisi.

Le indagini sulle strutture di fondazione seguono le indicazioni già fornite ai paragrafi precedenti per quanto riguarda le strutture di c.a. In particolare, tali indagini sono necessarie laddove si riscontrino evidenti segni di cedimento in corrispondenza del terreno e delle strutture di fondazione – situazione nella quale le NTC2018 (§8.3) richiedono la verifica di sicurezza.

Nel caso in cui l'analisi storico-critica abbia permesso una ragionevole datazione delle strutture di fondazione individuando eventuali discontinuità/disomogeneità è possibile effettuare indagini mirate per quanto riguarda la profondità del piano di posa e la localizzazione.

2.4.2 Indagini sperimentali per la caratterizzazione di materiali e strutture

La caratterizzazione meccanica dei materiali è necessaria per individuare, per quanto riguarda sia le costruzioni di c.a. sia le costruzioni di muratura, valori rappresentativi delle caratteristiche meccaniche da impiegare in fase di modellazione, analisi e valutazione della sicurezza. L'uso di indagini in situ e in laboratorio dipende anche da fattori strettamente legati al problema delle risorse disponibili, in termini sia di tempo sia economici, diversificati a seconda del valore attribuito all'edificio stesso, dell'entità dei danni e del tipo di intervento.

I metodi di esecuzione delle indagini su materiali e strutture si differenziano, ovviamente, in base alla tipologia costruttiva del manufatto considerato. Anche in questo caso, nel seguito, è stata effettuata pertanto una distinzione tra costruzioni di c.a. e costruzioni di muratura; le indicazioni riportate sono da considerarsi orientative e non esaustive di tutte le peculiarità riscontrabili nei manufatti, da analizzarsi pertanto caso per caso.

Costruzioni di calcestruzzo armato

Le prove per la determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali e degli elementi strutturali sono da eseguirsi, anch'esse, per livelli di approfondimento successivi.

In presenza di documentazione originaria di progetto, è comunque necessario comprovare la validità delle informazioni reperite mediante prove in situ o in laboratorio (su campioni appositamente estratti). Analogamente a quanto detto nel caso dei saggi in situ per il rilievo dei dettagli, si possono eseguire campagne di prove con approfondimento crescente. In particolare, facendo riferimento a quanto indicativamente riportato all'interno della Circ.7/2019, si individuano tre diversi livelli di prova:

- a. Prove limitate. Eseguite in numero limitato in-situ o in laboratorio su campioni estratti. Le prove limitate servono a completare le informazioni sulle proprietà dei materiali desunte dai disegni costruttivi o dai certificati originali di prova o altresì ipotizzate in base alla normativa in vigore all'epoca dell'edificazione (nel caso di progetto simulato). Forniscono una base utile alla valutazione preliminare della sicurezza.
- b. Prove estese. Eseguite in numero maggiore, rispetto al caso precedente, in-situ o in laboratorio su campioni opportunamente estratti. La campagna di prove è 'estesa' nel caso in cui non siano presenti i disegni costruttivi e/o i certificati originali di prova o, altresì quando le prove limitate hanno fornito informazioni disallineate, e servano informazioni attendibili ed in numero sufficiente sull'intero fabbricato, per poter eseguire una valutazione di sicurezza preliminare attendibile.
- c. Prove esaustive. Questa fase di prova corrisponde, solitamente, ad uno dei livelli di approfondimento successivo specificati in relazione ai risultati delle valutazioni preliminari. Le prove sono eseguite nei punti più critici o più incerti laddove si desidera raggiungere una conoscenza particolarmente accurata.

In maniera analoga a quanto effettuato per il rilievo dei dettagli costruttivi, la Circ.7/2019 applicativa alle NTC2018 individua, a titolo esclusivamente orientativo, la quantità di prove da eseguire per la caratterizzazione meccanica dei materiali in funzione del livello (limitato, esteso, esaustivo) di conoscenza del manufatto. Tali quantitativi sono riportati nella tabella C.8.5.V per le costruzioni di c.a.

Il quantitativo di elementi da sottoporre a prove è definito dal tecnico incaricato in base alla necessità di ottenere informazioni adeguate sul fabbricato, andando successivamente a integrare laddove ritenuto necessario poiché caratterizzato da evidenti criticità, tasso di sfruttamento elevato per gli elementi strutturali considerati, minore conoscenza della struttura ecc. L'approfondimento/integrazione delle prove di caratterizzazione meccanica è legato alle criticità riscontrate a seguito della preliminare valutazione di sicurezza; laddove si individuino problematiche specifiche in corrispondenza di taluni elementi costruttivi e altresì discreti margini di sicurezza in altri, è opportuno mirare le prove meccaniche laddove la loro esecuzione possa apportare margini di miglioramento significativi nel soddisfacimento delle verifiche di sicurezza.

Per quanto riguarda le costruzioni di c.a., per la localizzazione e l'esecuzione delle prove sui materiali costruttivi si possono seguire le seguenti indicazioni. Caso per caso, l'applicabilità e l'estensione delle indicazioni fornite è valutata dal tecnico incaricato.

➤ Prove per la caratterizzazione meccanica del calcestruzzo

Finalizzate a determinare il valore della resistenza media a compressione del calcestruzzo. Tra le tecniche di prova si suggeriscono, ad esempio, le seguenti:

- prove di tipo semi-distruittivo mediante estrazione di campioni cilindrici di adeguate dimensioni da sottoporre a schiacciamento. I carotaggi si possono eseguire su elementi tipo pilastro, preferibilmente in corrispondenza della sezione di mezzera (circa), caratterizzata da minore sforzo flettente in presenza di eventi sismici, o su elementi tipo trave, valutando opportunamente la sezione caratterizzata da sollecitazione flettente di minore entità. Generalmente, tenendo conto anche dello schema trave forte/pilastro debole risultante da una progettazione per soli carichi gravitazionali, è preferibile eseguire carotaggi in corrispondenza dei pilastri. La scelta degli elementi su cui effettuare le prove di tipo semi-distruittivo può essere motivata dal tecnico incaricato ad esempio attraverso il calcolo dei tassi di lavoro. A seguito dell'esecuzione della prova è necessario il ripristino dell'elemento strutturale.
- Prove di tipo non distruittivo. Rientrano in questa categoria, ad esempio, le prove di tipo ultrasonico e quelle di tipo sclerometrico (anche combinate – SonReb), le prove mediante

sonda Windsor, ecc. Trattandosi di prove non distruttive, esse possono essere eseguite in numero maggiore sull'edificio senza particolari prescrizioni sulla scelta dell'elemento (fatte salve le questioni di tipo tecnico-pratico). La selezione degli elementi da caratterizzare è motivata da progettista e descritta nella relazione tecnica. È opportuno, laddove possibile in relazione alle esigenze tecnico-pratiche, affiancare le prove non distruttive a quelle semi-distruttive (sugli stessi elementi), al fine di 'calibrare' i risultati delle prove non distruttive, affette da un maggiore grado di incertezza.

➤ **Prove per la caratterizzazione meccanica dell'acciaio d'armatura.**

La misura delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio si ottiene mediante prelievo di campioni ed esecuzione di prove a trazione delle barre estratte secondo quanto indicato nelle apposite normative.

Il prelievo dello spezzone di armatura (di lunghezza sufficiente all'esecuzione della prova) occorre sia effettuato, preferibilmente, in corrispondenza di una ripresa in modo da agevolare il successivo ripristino. Se il ripristino è eseguito mediante saldatura, è necessario preventivamente verificare la saldabilità del materiale. La posizione del prelievo è individuata a cura del tecnico incaricato. Il numero dei campioni da sottoporre a prova è funzione, oltre che della effettiva possibilità di estrazione, del livello di approfondimento conoscitivo che si persegue, delle informazioni possedute in relazione alla documentazione di progetto originaria e dei diametri e delle tipologie di armatura effettivamente presenti nel manufatto.

Qualora non si possano effettuare prove dirette su campioni di barra estratti si può – in via preliminare – ricorrere a fonti di letteratura di comprovata validità scientifica, a fronte di adeguata motivazione e giustificazione da parte del tecnico incaricato.

➤ **Prove di carico su orizzontamenti e coperture**

Le prove di carico – eseguite su elementi strutturali (solitamente orizzontamenti e coperture ma anche travi, sbalzi, scale, ecc.) – hanno la finalità di verificare sperimentalmente il comportamento sotto azioni di esercizio.

I carichi di prova (distribuiti o concentrati a seconda di cosa si vuole testare) occorre siano applicati in maniera graduale, a intervalli regolari prefissati, acquisendo le letture di spostamento e deformazione conseguenti all'introduzione del carico mediante opportuni strumenti di misura. L'entità del carico applicato è stabilita dal tecnico incaricato a fronte di apposite preliminari valutazioni che stabiliscano, noti con buona approssimazione i pesi propri permanenti e portati dell'orizzontamento, il valore effettivamente tollerabile. La prova permette di determinare il valore massimo del carico di esercizio sopportabile in sicurezza dal solaio.

Costruzioni di muratura

È necessario programmare ed organizzare adeguatamente le indagini diagnostiche sulle costruzioni di muratura, tenendo conto del grado di conoscenza che si vuole raggiungere, delle finalità complessive della valutazione di sicurezza e delle peculiarità del manufatto medesimo. Ad esempio, nel caso di manufatti di carattere storico-monumentale occorre programmare le indagini nell'ottica della massima conservazione dell'edificio, prediligendo metodi di indagine non distruttivi e localizzando i punti sui cui agire in accordo con la Soprintendenza.

Analogamente a quanto già effettuato per le costruzioni di c.a., anche nel caso degli edifici in muratura si possono prevedere livelli successivi di approfondimento per le campagne di indagine in situ, attraverso le quali è possibile ottenere informazioni progressivamente più affidabili.

Sulla base dei risultati del rilievo geometrico/strutturale e dei primi saggi in situ, è possibile eseguire una valutazione preliminare della sicurezza (eventualmente anche locale e/o semplificata) finalizzata ad individuare le zone affette da maggiori criticità, le principali vulnerabilità, gli elementi strutturali/non strutturali ai quali è necessario porre particolare attenzione, ecc. I risultati delle valutazioni preliminari di sicurezza possono essere impiegati, tenendo ovviamente conto del livello di conoscenza che si vuole raggiungere, per la progettazione di piani di indagine sperimentali di approfondimento sugli elementi strutturali, non strutturali, sulle caratteristiche dei materiali ecc., che consentano una maggiore affidabilità dei risultati ottenuti.

Analogamente al caso delle costruzioni di c.a., per la caratterizzazione meccanica dei materiali, la Circ. 7/2019 distingue tre diversi livelli di prova ad approfondimento crescente, di seguito sintetizzati:

- d. Prove limitate. Indagini non dettagliate e non estese, basate principalmente su esami visivi delle superfici, che prevedono limitati controlli degli elementi costituenti la muratura. Sono

previste rimozioni locali dell'intonaco per identificare i materiali di cui è costituito l'edificio. In questo caso, non avendo effettuato prove dirette sulla muratura, i valori delle caratteristiche meccaniche si possono desumere, in funzione della tipologia di tessitura muraria, da abachi o da tabelle di comprovata validità.

- e. Prove estese. Indagini visive, diffuse e sistematiche, accompagnate da approfondimenti locali. Oltre alla determinazione della tipologia di tessitura muraria, si possono prevedere analisi delle malte e, se significative, degli elementi costituenti, accompagnate da tecniche diagnostiche non distruttive (penetrometriche, sclerometriche, soniche, termografiche, radar, ecc.) ed eventualmente integrate da tecniche moderatamente distruttive (e.g. martinetti piatti), finalizzate a classificare in modo più accurato la tipologia muraria e la sua qualità.
- f. Prove esaustive. In aggiunta a quanto sopra specificato, si possono prevedere prove dirette sui materiali per determinarne i parametri meccanici, opportunamente motivate in quantità e tipologia dal tecnico incaricato (e.g. prove con martinetti piatti doppi, prove di taglio, ecc.). Le prove si eseguono su tutte le tipologie murarie o comunque su quelle relative agli elementi che, sulla base dell'analisi preliminare di sicurezza, sono risultati significativi per la valutazione della sicurezza. Per il trattamento dei dati si può fare riferimento alle indicazioni contenute all'interno delle NTC2018 e della corrispondente Circ. 7/2019.

In ogni caso, è opportuno che le indagini sperimentali siano eseguite su pannelli murari idonei, indisturbati e privi di fessurazioni evidenti e rimaneggiamenti, la cui tessitura muraria sia ritenuta rappresentativa dell'intera parete muraria di una specifica tipologia.

➤ **Prove per la caratterizzazione meccanica dei blocchi/elementi**

Tali tipi di prove sono finalizzati a determinare il valore della resistenza media a compressione degli elementi costituenti la parete muraria considerata, anche nel caso in cui essa presenti blocchi di diversa tipologia (muratura mista). Ad esempio, in presenza di elementi 'moderni', si possono impiegare procedure di comprovata validità (quali quelle suggerite per l'accettazione dei materiali delle nuove costruzioni di muratura). Nel caso di muratura di pietrame, le pietre possono essere sottoposte a prove di compressione in laboratorio su provini ricavati da carote e testati perpendicolarmente al loro piano di sedimentazione. Nel caso, invece, di muratura di mattoni/blocchi squadrati si possono effettuare prove di compressione in laboratorio su carote di diametro pari, approssimativamente, all'altezza del mattone o su elementi o porzioni di elementi integri.

➤ **Prove per la caratterizzazione meccanica della malta**

Le prove per la caratterizzazione della malta sono finalizzate a determinare la consistenza della stessa e ad ottenere una buona stima della resistenza meccanica a compressione, impiegando strumentazioni e procedure di comprovata validità scientifica.

➤ **Prove per la caratterizzazione meccanica delle pareti murarie**

Si tratta, in generale, di prove finalizzate alla determinazione delle caratteristiche meccaniche di pareti murarie di cui è ovviamente nota la tessitura. In questa categoria rientrano:

- Prove di tipo non-distruttivo, generalmente impiegate per determinare – mediante diverse tecnologie – la compattezza e l'omogeneità del materiale e al tempo stesso la presenza di vuoti, cavità, cavedi, distacchi, riempimenti, ecc. In questa categoria rientrano, ad esempio, le prove soniche, ultrasoniche, le prove termografiche, il georadar, ecc.
- Prove di tipo semi-distruttivo aventi rispettivamente la finalità di determinare lo stato tensionale presente su una specifica parete e le sue caratteristiche meccaniche, quali ad esempio le prove con martinetti piatti singoli e doppi, rispettivamente. Per l'esecuzione di queste prove possono essere impiegate le indicazioni contenute nei protocolli di prova reperibili al sito
- Prove di tipo semi-distruttivo aventi la finalità di stimare la resistenza a taglio delle pareti murarie, tra le quali rientrano, ad esempio, le prove di taglio diretto (shove test), da eseguirsi conformemente a norme di comprovata validità e previa specifica preparazione della superficie di prova.
- Prove di tipo distruttivo da eseguire su pareti destinate alla demolizione o sulle quali sono previsti interventi di rinforzo strutturale, quali, ad esempio, le prove di compressione semplice o compressione diagonale per valutare, rispettivamente, la resistenza a compressione della

parete o la sua resistenza a taglio. Per l'esecuzione di queste prove possono essere impiegate le indicazioni contenute nei protocolli di prova reperibili al sito

A fronte dell'esecuzione delle prove, è necessario effettuare una valutazione critica dell'attendibilità dei risultati ottenuti con riferimento alla categoria/tipologia di muratura ipotizzata inizialmente per la parete oggetto di interesse, aggiornando o integrando, se opportuno, la campagna sperimentale.

- **Prove di carico su orizzontamenti e coperture.** Valgono le considerazioni già esplicitate per quanto riguarda le costruzioni di calcestruzzo armato.

2.5 Caratterizzazione geologico-tecnica del sito

La determinazione delle caratteristiche litostratigrafiche e geomeccaniche del sito su cui sorge la costruzione oggetto di interesse permette la definizione del modello geologico del sito e la conseguente valutazione dell'azione sismica per la definizione del modello sismico.

Nell'ambito del percorso conoscitivo finalizzato alla ricostruzione e caratterizzazione geologica del sito in esame, si possono eseguire, se non già disponibili, indagini geognostiche commisurate alla complessità geologica del sito e alla tipologia di opera oggetto di verifica. La conoscenza degli aspetti geologici può avvenire o mediante indagini dirette in situ oppure tramite valutazioni tecniche effettuate su documentazione esistente reperita.

L'impiego di documentazione esistente è ammesso, previa verifica da parte del geologo, purché si riferisca ad un intorno 'geologicamente significativo', sia quantitativamente sufficiente e risulti attendibile circa le condizioni morfologiche (e.g. pianura o pendio) e di pericolosità del sito. A condizione che sia dimostrata la sussistenza delle medesime condizioni geologiche, geomorfologiche, litotecniche e strutturali, e ferma restando la necessità di caratterizzare i 30 m o comunque di una profondità di indagine idonea a caratterizzare i terreni posti al di sopra del bedrock sismico se ubicato ad una profondità inferiore a m 30, e limitare le assimilazioni ad un intorno di modesta estensione, sulla base delle indagini disponibili si può definire la categoria di sottosuolo di fondazione. In assenza di indagini sismiche significative, conformemente a quanto previsto dalle attuali normative tecniche, non è possibile attribuire la categoria di sottosuolo ed occorre pertanto procedere attuando specifiche indagini finalizzate alla ricostruzione del modello geologico-tecnico e alla definizione dell'azione sismica.

Per determinare il modello geologico – a titolo esemplificativo ma non esaustivo – occorre eseguire, almeno, prove penetrometriche statiche e/o dinamiche pesanti (esistenti e/o di nuova realizzazione) all'interno del volume geotecnico significativo, mentre per la definizione del modello sismico sono realizzate indagini sismiche anche di superficie (esistenti e/o di nuova realizzazione).

Indagini specialistiche integrate da esperte valutazioni tecniche si rendono altresì necessarie laddove si siano rilevati:

- cedimenti attivi delle fondazioni o importanti dissesti;
- fenomeni di scorrimento e/o ribaltamento dovute a condizioni morfologiche sfavorevoli;
- modifiche apportate al profilo del terreno in prossimità dell'edificio;
- aree a pericolosità geomorfologica elevata o molto elevata;
- possibili fenomeni di liquefazione.

2.6 Relazioni tecniche ed elaborati sulla conoscenza

Al termine del processo conoscitivo, sono redatte relazioni tecniche e elaborati grafici finalizzati a sintetizzare i risultati ottenuti dalle indagini in-situ e/o derivanti dall'analisi della documentazione disponibile. Si possono distinguere, in particolare:

- La relazione tecnico-conoscitiva, che descrive il manufatto e riassume l'organizzazione generale dei rilievi, delle indagini effettuate e relativa motivazione e ne illustra in modo accurato i risultati ottenuti.
- La relazione geologico-tecnica, che illustra le fasi conoscitive e le assunzioni effettuate per la formulazione del modello geologico, sulla base delle conoscenze disponibili e delle eventuali indagini in-situ.

2.6.1 **Relazione tecnico-conoscitiva**

La **relazione tecnico-conoscitiva** descrive il manufatto nella sua totalità e sintetizza i risultati delle campagne conoscitive effettuate, consentendo di individuare eventuali carenze, problematiche e criticità riguardanti elementi strutturali, non strutturali e le componenti che con essi possono interagire (e.g. gli impianti). La relazione è corredata da elaborati grafici e da opportuna documentazione fotografica atte a renderne più agevole e precisa la lettura e l'utilizzo. La relazione tecnico-conoscitiva è necessaria per motivare e giustificare adeguatamente la conoscenza raggiunta sul manufatto e le assunzioni effettuate nella modellazione, nell'analisi e nelle verifiche di sicurezza.

A titolo esemplificativo ma non esaustivo, la relazione contiene le seguenti informazioni:

1. La **descrizione generale del manufatto**, comprensiva di indicazioni circa la localizzazione, la destinazione funzionale, la dimensione in pianta di ciascun piano e la volumetria complessiva, le altezze di interpiano, l'epoca di realizzazione, eventuali interventi strutturali significativi successivi alla costruzione, le interferenze con il territorio e con le costruzioni esistenti adiacenti, eventuali vincoli (ad esempio edificio storico monumentale, vincolo idrogeologico, ecc.).
2. La descrizione della **documentazione originaria di progetto** reperito e di eventuali interventi successivi, se presente, con indicazione delle informazioni utili ai fini della valutazione di sicurezza.
3. La descrizione dei **risultati ottenuti dall'analisi storico-critica**. Essa può essere corredata da planimetrie e/o piante dei vari piani con indicazione delle epoche costruttive e realizzative del manufatto o delle sue parti costituenti.
4. La **definizione dello schema strutturale del manufatto** considerato. La descrizione può essere accompagnata da piante di carpenteria redatte ex-novo o a modifica/integrazione di quanto reperito. Per ciascun impalcato del fabbricato devono potersi chiaramente leggere gli schemi strutturali, la posizione e la tipologia degli elementi primari di c.a. o di muratura, l'orditura dei solai, la posizione degli elementi non strutturali, ecc.
5. La definizione delle **modalità di esecuzione delle indagini**. Il tecnico incaricato fornisce indicazione su come siano stati organizzati i livelli successivi di approfondimento conoscitivo, motivandone la necessità in relazione ai risultati delle verifiche preliminari di sicurezza e delle criticità e problematiche di carattere strutturale riscontrate nel manufatto, nonché in funzione del possibile soddisfacimento dei requisiti di sicurezza.
6. L'illustrazione dell'**organizzazione delle campagne di rilievo geometrico** degli elementi strutturali e non strutturali, ad esempio inserendo nel testo planimetrie con indicazione degli elementi rilevati direttamente in situ.
7. La descrizione degli **elementi costruttivi**, inclusi gli elementi strutturali (in termini di dimensione delle sezioni, luce degli elementi strutturali, tipologia degli elementi non strutturali, ecc.).
8. L'illustrazione dell'organizzazione delle campagne di indagine in situ per la determinazione dei **dettagli costruttivi** (elementi strutturali e non strutturali). La descrizione delle attività può essere accompagnata da piante dei vari piani con indicazione degli elementi sottoposti indagati con specifico identificativo e immagini relative ai saggi. Per ciascun saggio effettuato è prevista, come precedentemente detto, una scheda sintetica con identificazione del saggio, documentazione fotografica, identificazione della tipologia di elemento verticale/orizzontale strutturale/non strutturale con descrizione delle caratteristiche geometrico/strutturali e dei carichi.
9. L'illustrazione dei **dissesti rilevati**, mediante idonea documentazione fotografica con indicazione dei punti di presa, corredata da piante che, ai vari piani del fabbricato, indicano la posizione delle lesioni, fessure, cedimenti, ecc. rilevati, mettendone in evidenza le probabili cause. Indicazione dei provvedimenti urgenti per l'eventuale messa in sicurezza e definizione di un sistema di monitoraggio per valutarne lo stato di evoluzione.
10. L'illustrazione delle **criticità e delle vulnerabilità locali emerse a fronte delle campagne conoscitive**, indicandone il posizionamento nell'edificio e la rilevanza (laddove possibile). Immagini esplicative possono essere inserite ai fini di chiarificazione.
11. L'individuazione delle **aree che non è stato possibile rilevare o indagare**, fornendo nel caso le motivazioni (inaccessibilità, inagibilità, ecc.). È opportuno indicare l'incidenza delle porzioni escluse e la loro influenza sull'analisi complessiva del manufatto.

12. L'illustrazione dell'organizzazione delle **campagne di caratterizzazione meccanica dei materiali e delle strutture**, motivando la scelta degli elementi indagati (ad esempio mediante calcolo del tasso di lavoro nelle strutture di c.a.). Piante dei vari piani con indicazione degli elementi sottoposti a prova ed eventuali immagini possono essere impiegate per completare la descrizione.
13. Le formulazioni impiegate per il **trattamento dei dati di laboratorio relativi alle prove distruttive e/o non distruttive** impiegate e i valori delle caratteristiche meccaniche conseguentemente assunti nella successiva fase di modellazione ed analisi, fornendone interpretazione critica.
14. L'indicazione del **livello di conoscenza raggiunto** (anche per elemento e/o sottostruttura qualora, a seconda delle necessità, si assumano diversi valori nelle diverse fasi di analisi/verifica) e del relativo fattore di confidenza assunto in sede di valutazione di sicurezza.

2.6.2 Relazione geologica

La relazione geologica illustra le operazioni conoscitive e le assunzioni effettuate per arrivare alla caratterizzazione geologica del sito ed alla formulazione del modello di riferimento. Essa contiene:

1. La rappresentazione cartografica degli **elementi geologici, geomorfologici e strutturali** che possono influenzare o essere influenzati direttamente o indirettamente dal manufatto oggetto di interesse.
2. I **caratteri stratigrafici, litotecnici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici e sismici** di un intorno significativo dell'area in esame, al fine di permettere la definizione del modello geologico di riferimento, nonché gli eventuali vincoli desunti dallo strumento urbanistico vigente.
3. Le **indagini geognostiche** effettuate al fine di definire il modello geologico e supportare la definizione dell'azione sismica con riferimento alla relazione sulla modellazione sismica.
4. La descrizione del **modello geologico** di riferimento elaborato per il sito su cui sorge la costruzione.

2.6.3 Elaborati grafici

A corredo della **relazione tecnico-conoscitiva**, si possono redigere i seguenti elaborati dei quali descrizione dettagliata è stata già fornita ai paragrafi precedenti.

1. **Planimetria generale di inquadramento**, piante architettoniche, prospetti e sezioni significative del manufatto. È necessario che il manufatto oggetto di interesse sia ben individuato nel contesto territoriale di appartenenza; soprattutto nel caso in cui si abbia a che fare con più unità strutturali (ad esempio nel caso di diversi 'blocchi' di uno stesso complesso), l'unità oggetto di interesse sia evidenziata con individuazione degli eventuali giunti presenti. Il rilievo geometrico della costruzione è necessario sia completo, tenendo conto di tutte le parti dell'opera effettivamente raggiungibili. Nel caso vi siano zone inaccessibili, occorre individuarle in appositi elaborati (piante o sezioni) e fornire le motivazioni della mancata ispezione.
2. Piante e sezioni che individuano lo **schema strutturale** dell'edificio (e.g. posizione e dimensione degli elementi strutturali ad ogni piano; disposizione e dimensione dei giunti tecnici/sismici laddove presenti, discontinuità strutturali, perdita progressiva o incipiente di continuità/collegamento fra parti). È opportuno redigere una pianta per ciascun impalcato tipo.
3. Tavole grafiche raffiguranti la localizzazione delle indagini finalizzate **al rilievo dei dettagli costruttivi** eseguite sugli elementi strutturali (travi, pilastri, setti, pareti, orizzontamenti, fondazioni, ecc.).
4. Nel caso di costruzioni di c.a. **tavole strutturali** con indicazione della dimensione di tutti gli elementi rilevati, della disposizione, tipologia e diametro delle armature longitudinali, delle staffe e degli eventuali ferri piegati (tavole di carpenteria). Le informazioni riportate nelle tavole strutturali consentono di distinguere chiaramente quanto è ricavato dai saggi in situ e quanto è stato altresì 'esteso' ad elementi simili per tipologia, dimensione, condizioni di vincolo o di carico. A tal fine, si possono redigere **schede sintetiche** (una per ciascun saggio) con identificazione del saggio, documentazione fotografica, sezione tipo ricavata

con indicazione delle armature (diametro, tipologia e posizione) direttamente rilevate e di quelle altresì dedotte per analogia, in base a ragionevoli considerazioni o dal progetto originario reperito

5. Nel caso delle strutture di muratura, tavole grafiche (piante e, se necessari, prospetti e sezioni) raffiguranti il **rilievo materico delle strutture verticali** ed associazione di una categoria di muratura ad ogni parete strutturale. Inoltre, per ciascun saggio può essere redatta una **scheda sintetica** con identificazione del saggio, la documentazione fotografica, l'identificazione della tipologia di muratura e la descrizione delle maggiori caratteristiche riscontrate, valutate secondo i punti precedenti.
6. Tavole grafiche con l'indicazione del posizionamento e della tipologia degli **elementi non strutturali** – tamponamenti, tramezzi, comignoli, cornicioni, aggetti, parapetti, ecc.
7. Tavole grafiche (piante per ciascun piano del fabbricato) contenenti informazioni relative alla **tipologia e orditura dell'orizzontamento**, alla dimensione dei vari elementi portanti e degli strati di riempimento sovrastanti. Anche nel caso degli orizzontamenti, si può fare ricorso a schede sintetiche con le informazioni dedotte dai saggi.
8. Tavole del **rilievo dei dissesti**: indicazione della posizione delle lesioni e dei dissesti rilevati con riferimento alla entità (e.g. lesioni lievi, moderate, gravi, ecc.) sui vari elementi strutturali verticali e orizzontali, eventualmente corredate da documentazione grafica.
9. Tavole grafiche con indicazione delle **vulnerabilità/criticità locali emerse**, con indicazione della loro posizione all'interno del manufatto e documentazione fotografica corrispondente se ritenuta significativa.
10. Tavole grafiche (piante, prospetti e sezioni) raffiguranti la **localizzazione delle prove meccaniche eseguite su elementi e strutture** (travi, pilastri, setti, pareti, orizzontamenti, fondazioni, ecc.).

3 Modellazione, analisi e verifiche di sicurezza

La modellazione e l'analisi strutturale sono significativamente influenzate dai risultati ottenuti dal percorso conoscitivo della costruzione, eseguito conformemente a quanto riportato ai paragrafi precedenti.

La scelta della strategia modellazione e di analisi, infatti, è dipendente dal livello di conoscenza raggiunto per la costruzione in esame. Modellazioni 'raffinate' si associano ad un elevato grado di conoscenza dei materiali, dei dettagli costruttivi e delle strutture in generale. Solo tramite il raggiungimento di un adeguato livello di conoscenza è infatti possibile l'elaborazione di modelli strutturali affidabili e, conseguentemente, l'esecuzione di valutazioni di sicurezza attendibili, a livello locale e globale.

A livello locale occorre elaborare modelli in grado di descrivere il comportamento di singoli elementi, porzioni di edificio o sottostrutture caratterizzati da una certa 'autonomia' rispetto al resto della costruzione. L'indipendenza di queste porzioni dal resto del manufatto deriva, nella maggior parte dei casi, dall'assenza o dall'inefficacia dei sistemi di ritenuta e dei collegamenti/ammorsamenti con le zone adiacenti.

A livello globale i modelli consentono la rappresentazione del comportamento strutturale 'complessivo' della costruzione, considerata quale struttura autonoma nella quale gli elementi strutturali (travi, pilastri, pareti, ecc.) collaborano ed interagiscono attivamente tra loro.

Nel caso di costruzioni esistenti di calcestruzzo armato, anche in assenza di elementi di collegamento disposti nelle due direzioni (come accade spesso nel caso di edifici progettati per soli carichi verticali), è, in generale, possibile l'espletamento di un comportamento strutturale di insieme. I modelli globali, se correttamente realizzati, possono pertanto considerarsi ragionevolmente rappresentativi dell'effettiva conformazione strutturale; resta altresì da valutare la possibile attivazione di fenomeni ribaltamento fuori piano di elementi di tamponamento, l'eventuale collasso di elementi non strutturali quali cornicioni, gronde, comignoli, parapetti, balconi, ecc. che solitamente non sono direttamente inclusi all'interno di modelli complessivi.

Per quanto concerne le costruzioni esistenti di muratura, l'espletamento di un comportamento di insieme non è immediato e risulta fortemente dipendente dalla qualità muraria, dal grado di connessione presente tra i vari elementi strutturali verticali e orizzontali e dalla presenza/assenza di incatenamenti o cordoli. Il comportamento di insieme si attua, pertanto, una volta riconosciuta un'adeguata qualità della muratura ed esclusa, attraverso idonei presidi/sistemi, l'attivazione dei meccanismi locali (e.g. ribaltamento fuori dal piano, flessione verticale, ribaltamento del cantonale, ecc.). Tali cinematismi sono talvolta identificabili in maniera relativamente semplice qualora si disponga di un accurato rilievo del quadro fessurativo, dei dissesti e delle strutture.

In presenza di strutture complesse, ad esempio costituite da più unità strutturali in aggregato, il modello strutturale globale può considerarsi affidabile qualora si siano 'risolte' preventivamente le problematiche locali, ad esempio relative all'attivazione di meccanismi locali di singole porzioni strutturali. Nel caso di modellazione globale di una o più unità strutturali, occorre tenere opportunamente in considerazione l'interazione con le US adiacenti in termini di azioni e vincoli e, più in generale, con il comportamento dell'intero aggregato. Il modello a livello globale diventa quindi spesso rappresentativo di una situazione 'migliorata' rispetto all'esistente, nella quale si considerano attuati accorgimenti e sistemi in grado di permettere l'espletamento del comportamento scatolare. Resta complesso riprodurre l'assenza di idonei ammortamenti, lo scompaginamento dei paramenti murari, l'assenza di diatoni di collegamento trasversale, ecc.

A fronte dell'elaborazione di accurate modellazioni di livello sia locale sia globale (laddove entrambe necessarie) è possibile procedere con l'esecuzione di analisi strutturali – anch'esse di livello locale e/o globale – seguendo quanto attualmente previsto, da un punto di vista metodologico e procedurale, dalle vigenti NTC2018. L'analisi strutturale permette la valutazione della domanda agente sul singolo elemento strutturale o sulla sottostruttura/porzione di edificio analizzata, in termini di caratteristiche della sollecitazione, deformazioni, spostamenti, ecc. a seconda della metodologia impiegata.

La successiva verifica di sicurezza, sia essa nei confronti di azioni statiche o sismiche, si esegue tramite comparazione tra la domanda derivante dall'analisi strutturale e la capacità dell'elemento/sottostruttura, calcolata anch'essa sulla base delle indicazioni riportate in normativa o, al più, ove previsto, in fonti scientifiche di comprovata validità. La valutazione critica dei risultati ottenuti permette di individuare le problematiche strutturali e le vulnerabilità

(talvolta riguardanti anche elementi non strutturali) presenti all'interno del fabbricato, nonché la modalità di attivazione del collasso, distinguendo in particolare tra meccanismi di tipo fragile e meccanismi duttili.

La valutazione della sicurezza può quindi effettuarsi secondo le fasi di seguito schematicamente riportate.

- **Valutazione delle azioni e loro combinazione.** Questa fase prevede il calcolo delle azioni (permanenti, variabili, eccezionali, sismiche) agenti sul fabbricato e la loro combinazione.
- **Modellazione strutturale.** Questa fase comprende l'elaborazione di modelli locali e globali del manufatto o di sue porzioni rappresentative, comprensiva della definizione dei legami costitutivi dei materiali, dei vincoli esterni e interni, dell'interazione terreno-struttura, del contributo degli elementi non strutturali, ecc.
- **Analisi strutturale e definizione della domanda.** L'analisi strutturale, sia essa locale o globale, e la corrispondente valutazione della domanda agente sugli elementi si eseguono secondo le metodologie contemplate dalle attuali norme tecniche per le costruzioni.
- **Valutazione della capacità e verifica della sicurezza.** La capacità in termini di resistenza, spostamento e/o deformazione è calcolata secondo le indicazioni fornite da normativa. Le verifiche da eseguire sono indicate nelle norme tecniche per le costruzioni.

3.1 Valutazione delle azioni e loro combinazione

3.1.1 Pesi propri permanenti e portati

Per la definizione dei carichi permanenti propri e portati da impiegare nelle successive fasi di modellazione ed analisi strutturale si possono impiegare le informazioni ricavate dalla precedente fase conoscitiva. Ad esempio, i valori dei pesi propri permanenti e portati degli elementi strutturali verticali e orizzontali e degli elementi non strutturali (tamponamenti, tramezzi, cornicioni, parapetti, controsoffitti, ecc.) sono deducibili dalle indagini endoscopiche eseguite in corrispondenza dei solai e dalla conseguente ricostruzione della sovrastante stratigrafia.

Laddove le indagini in-situ non siano state direttamente eseguite (ad esempio nel caso di alcuni campi di orizzontamenti e/o copertura, nel caso di tamponamenti ecc.), si possono effettuare assunzioni ragionevolmente motivate, ad esempio giustificando l'estensione di informazioni note dai rilievi effettuati su elementi simili per luce, tipologia, ecc.

3.1.2 Azioni variabili

Per la definizione delle azioni variabili quali neve, vento, temperatura ed azioni eccezionali (incendi, esplosioni ed urti) si fa riferimento a quanto specificamente riportato all'interno delle NTC2018 vigenti e, se necessario, alla corrispondente Circ. 7/2019. Analoghe considerazioni valgono per quanto riguarda il carico variabile di esercizio nei vari locali e/o nelle varie porzioni di manufatto, definito sulla base della destinazione d'uso prevista e riportata all'interno della relazione tecnico-conoscitiva.

3.1.3 Azione sismica

La modellazione dell'azione sismica è funzione del tipo di modellazione ed analisi (lineare o non-lineare) eseguita sul manufatto oggetto di indagine.

Le norme tecniche per le costruzioni forniscono le indicazioni per la definizione degli **spettri di risposta** di riferimento in termini di accelerazione e spostamento, in base alle caratteristiche della costruzione (vita nominale, coefficiente d'uso), del sito (queste ultime deducibili o da indagini geologiche dirette o dedotte da relazioni tecniche disponibili) ed allo stato limite considerato. Se, a seguito dell'importanza del manufatto o della presenza di evidenti criticità a livello di terreno e/o fondazione, si sono eseguite indagini geologiche e geotecniche approfondite si possono effettuare analisi della risposta sismica locali finalizzate alla definizione di uno spettro di risposta specifico per il sito di interesse, da impiegare previa adeguata motivazione.

Le valutazioni di sicurezza sugli elementi non strutturali (e.g. tamponamenti) e l'analisi dell'attivazione dei meccanismi locali di collasso si effettuano impiegando **spettri di risposta di piano**, capaci di 'filtrare' l'azione sismica tenendo effettivamente conto della posizione dell'elemento considerato nel contesto complessivo della costruzione. Le modalità di definizione e di calcolo degli spettri di piano sono quelle fornite dalla circolare applicativa alle norme

tecniche per le costruzioni (Circ. n. 7/2019) o, se opportunamente motivate, da formulazioni scientifiche di comprovata validità.

In generale, per eseguire analisi di tipo lineare, occorre definire spettri di risposta in accelerazione; nel caso di analisi statiche non lineari (*pushover*) è necessario definire lo spettro di risposta in termini di spostamento. Qualora si eseguano analisi dinamiche non lineari, la selezione degli accelerogrammi impiegati (in numero ed in tipologia) si effettua in base a quanto riportato nelle attuali norme tecniche per le costruzioni.

3.1.4 Combinazioni di carico

Le combinazioni di carico da impiegare per l'analisi della sicurezza statica e sismica degli edifici esistenti sono definite, per i diversi stati limite, dal D.M.17/01/2018.

Per i carichi permanenti (G_1 , G_2), conformemente a quanto riportato al §8.5.5 del D.M.17/01/2018, si possono adottare valori ridotti del coefficiente parziale γ_G , purché opportunamente giustificati e motivati in funzione del grado di approfondimento conoscitivo raggiunto sul manufatto o sulle sue componenti (strutturali e non strutturali). Il valore di γ_G tiene in considerazione due tipi di incertezze, vale a dire quelle legate alla modellazione ($\gamma_{E,G}$) e quelle legate ai carichi medesimi (γ_g), a sua volta dipendenti dalla classe di conseguenza del manufatto (a titolo esplicativo, si faccia riferimento a quanto riportato nell'Eurocodice 0 - EN1990:2002 – in merito alla definizione dei coefficienti parziali di sicurezza). Un accurato rilievo geometrico-strutturale e dei materiali può consentire di adottare coefficienti parziali ridotti, a fonte di adeguata motivazione e giustificazione delle assunzioni effettuate, come specificato, ad esempio, nell'Eurocodice 0.

3.2 Modellazione strutturale

3.2.1 Modellazione meccanica dei materiali

Il modello costitutivo dei materiali (siano essi acciaio, calcestruzzo, acciaio d'armatura, muratura, legno o altro) è definito in funzione della tecnica di modellazione impiegata (lineare o non lineare) e del comportamento meccanico medesimo dei materiali, valutato, in termini di resistenza, modulo elastico, caratteristiche di degrado e/o danneggiamento, mediante le prove sperimentali eseguite durante la fase conoscitiva. La scelta ed il grado di definizione e/o dettaglio del modello impiegato sono funzione del livello conoscenza raggiunto per il materiale, l'elemento e/o la sottostruttura.

In presenza di modellazioni ed analisi lineari, per la rappresentazione 'indiretta' dei fenomeni di fessurazione allo stato limite ultimo – nel caso di costruzioni di c.a. e di muratura - si possono impiegare riduzioni della rigidezza fino al 50%, conformemente a quanto previsto dalle attuali normative tecniche per le costruzioni; eventualmente si può fare ricorso a fonti scientifiche di comprovata validità. In generale, il livello di fessurazione e la conseguente riduzione della rigidezza possono essere stimati in funzione dell'entità dei carichi agenti (verticali e orizzontali) e del tasso di sfruttamento delle sezioni, tenendo conto del fattore di comportamento adottato e dello stato limite a cui ci si riferisce.

Per quanto riguarda la modellazione non-lineare del calcestruzzo si può fare riferimento alle schematizzazioni di normativa o a modelli scientifici di comprovata validità. È possibile, ad esempio, tenere in considerazione gli effetti del confinamento dovuto alle staffe, alla disposizione dell'armatura longitudinale, al carico assiale, ecc. sia in termini di resistenza del materiale sia in termini di duttilità, distinguendo ad esempio tra calcestruzzo non confinato (usato, ad esempio, per il copriferro) e calcestruzzo confinato (impiegato per il nucleo interno compresso, funzione dello schema delle armature trasversali e longitudinali); si può includere o trascurare la resistenza a trazione del materiale, modellare il *pinching*, ecc.

La modellazione del comportamento post-elastico delle barre d'armatura è solitamente effettuata fino al valore del carico massimo ed al corrispondente valore della deformazione, escludendo pertanto il ramo instabile e la strizione.

Per quanto riguarda il comportamento meccanico non lineare delle murature si possono impiegare sia legami che 'puntualmente' definiscono le caratteristiche sia dei blocchi sia della malta (ad esempio nel caso in cui si ricorra ad una modellazione su microscala) oppure degli specifici legami costitutivi della muratura intesa come sistema elementi e malta, le cui caratteristiche sono definite (in resistenza, modulo elastico, degrado, ecc.) sulla base di prove sperimentali o di fonti di letteratura. Anche in questo caso si possono effettuare assunzioni quali

l'assenza di resistenza a trazione della muratura, assenza di scorrimento in corrispondenza dei letti di malta, ecc. Possono altresì essere considerati modelli non lineari semplificati degli elementi strutturali ammettendo per essi un comportamento bilineare elastico perfettamente plastico in termini di taglio spostamento in base alle caratteristiche geometrico strutturali del pannello.

3.2.2 Modellazione locale

L'attivazione di eventuali meccanismi di collasso/cedimenti parziali si valuta al momento in cui, a seguito dei rilievi e delle indagini in situ, la struttura non evidenzia un comportamento strutturale di insieme e sia altresì predisposta all'insorgere di problematiche localizzate. Tale condizione si verifica prevalentemente (ma non esclusivamente) nel caso di costruzioni di muratura.

I meccanismi locali interessano solitamente singoli elementi strutturali (ad esempio singole pareti murarie che possono andare da terra sino a copertura o estendersi al singolo piano) o porzioni di manufatto (ad esempio cunei d'angolo, loggiati, ecc.) sottoposti ad azioni agenti fuori dal piano (e.g. fenomeni di ribaltamento ad esempio dovuti alla presenza di archi, volte, puntoni o altri elementi spingenti) o, talvolta, nel piano.

L'individuazione dei meccanismi di collasso è agevolata dall'esecuzione del rilievo geometrico-strutturale e dei dissesti descritti ai paragrafi precedenti, in base ai quali è possibile riconoscere le zone caratterizzate da una scarsa qualità della tessitura muraria, dall'assenza di adeguato ammassamento tra pareti ortogonali o tra pareti e orizzontamenti, dall'assenza di catene o di altri elementi di contrasto ad azioni spingenti, ecc. In presenza di edifici in aggregato, o altresì in presenza di più unità strutturali tra loro adiacenti, nell'individuazione dei possibili meccanismi locali occorre tenere presente l'eventuale interazione tra elementi 'di confine' o appartenenti a più di una unità.

Ciascun meccanismo locale individuato può essere rappresentato mediante schematizzazioni di corpo rigido; la corretta valutazione del meccanismo richiede una serie di assunzioni per quanto riguarda gli eventuali elementi di sconnessione e la loro rappresentazione, i vincoli esterni, l'inserimento di vincoli interni atti a rappresentare ritegni quali catene, gli ammassamenti, l'interazione con unità adiacenti, ecc.

3.2.3 Modellazione globale

Il modello strutturale globale del fabbricato può essere realizzato a fronte di una valutazione preventiva dell'attivazione dei meccanismi di tipo locale, avendo verificato che non si attivino fenomeni locali quali, ad esempio, il ribaltamento fuori dal piano di pareti o porzioni di manufatto a seguito di significative spinte orizzontali, ecc.

Il modello tridimensionale globale della struttura è realizzato sulla base dei risultati delle campagne di rilievo e indagini in situ descritte ai paragrafi precedenti, che permettono di schematizzare in maniera affidabile il comportamento strutturale di insieme del manufatto e, laddove necessario, le caratteristiche specifiche degli elementi strutturali in base ai dettagli costruttivi.

I modelli globali possono avere diversi gradi di accuratezza in relazione a quanto approfonditamente si conosce il fabbricato medesimo. Approcci di tipo non-lineare richiedono, in generale, una conoscenza più approfondita dei materiali, delle sezioni resistenti degli elementi e del comportamento strutturale medesimo.

Per quanto riguarda le **costruzioni di muratura** la scelta della tipologia di modellazione da impiegare – su macroscala (e.g. modellazione a telaio equivalente), mesoscala (e.g. modellazione mediante elementi bidimensionali aventi caratteristiche meccaniche della muratura intesa come somma di elementi resistenti e malta) o microscala (e.g. modellazione in cui a ciascun componente della muratura, elementi e malta, si attribuiscono idonei legami costitutivi puntualmente) – è funzione sia del livello di approfondimento conoscitivo raggiunto sul manufatto in merito a geometria, caratteristiche dei materiali e dettagli costruttivi, quadro fessurativo, ecc. sia degli obiettivi medesimi dell'analisi.

Nel caso di modellazione non-lineare delle **costruzioni di c.a.** si possono impiegare principalmente due diversi approcci, rispettivamente detti a 'plasticità diffusa' e a 'plasticità concentrata'. Nel primo caso, la sezione si può discretizzare in una serie di fibre di adeguata dimensione alle quali si attribuiscono legami costitutivi di materiale che tengono conto – in merito a resistenza, duttilità e degrado – dei risultati della caratterizzazione meccanica e, in relazione alla sezione ed alla disposizione delle armature, del grado di confinamento. In tal modo sono direttamente riportate all'interno del modello le fonti di non-linearità di materiale.

Nel caso di plasticità concentrata si adottano schematizzazioni semplificate (ad esempio in termini di momento-curvatura o momento-rotazione) in corrispondenza delle zone in cui si attende lo sviluppo delle deformazioni; la maggiore difficoltà consiste proprio nella definizione delle cerniere plastiche, della loro lunghezza e della loro collocazione all'interno del manufatto. La lunghezza della zona dissipativa può essere valutata tramite le formulazioni previste dalle attuali norme tecniche o da letteratura scientifica di comprovata validità, tenendo conto – laddove possibile – delle differenze tra comportamento monotono e ciclico e dei fenomeni di scorrimento tra acciaio e calcestruzzo.

Per la modellazione degli **elementi non strutturali** – è il caso, ad esempio, dei tamponamenti rilevanti nel caso di costruzioni di c.a. - si possono adottare diverse modellazioni sulla base di quanto riportato all'interno di fonti scientifiche di comprovata validità. La modellazione degli elementi non strutturali occorre quando essi hanno (o possono avere) significativa influenza sul comportamento globale del fabbricato. Ad esempio, per quanto riguarda i tamponamenti inseriti in un telaio di c.a., sia in campo lineare sia in campo non lineare, può essere utile ricorrere a modellazioni a puntone equivalente, in grado di simulare con un buon margine di approssimazione il contributo irrigidente delle pareti nel caso in cui esse siano adeguatamente ancorate al telaio circostante per livelli progressivamente crescenti di azione orizzontale. Per altre tipologie di elemento non strutturale (e.g. cornicioni, comignoli, camini, parapetti, elementi di decoro, ecc.) si può optare per una rappresentazione dell'elemento non strutturale solo in termini di massa, trascurandone il contributo in rigidità laddove non significativo. In ogni caso, la scelta di modellare o, altresì, non modellare gli elementi non strutturali occorre sia motivata opportunamente dal tecnico incaricato.

I vincoli esterni inseriti per rappresentare l'**interazione terreno-struttura** (incastrati, cerniere, molle di adeguata cedevolezza, ecc.) è necessario siano rappresentativi del collegamento presente tra la sovrastruttura e la struttura di fondazione e delle caratteristiche geotecniche del sottosuolo.

L'interazione terreno-struttura può essere rappresentata in diversi modi, in funzione della tipologia di sottosuolo definita mediante le prove geologiche o in base all'analisi della documentazione tecnica disponibile di riferimento. Il tipo di vincolo atto a rappresentare il collegamento tra struttura e fondazione può variare in funzione delle caratteristiche del terreno (ad esempio si possono impiegare incastrati nel caso di suolo rigido o molle di adeguata rigidità in funzione del coefficiente di sottofondo in presenza di terreni cedevoli); analogamente, si possono adottare diversi schemi strutturali per la trave di fondazione (trave su più appoggi, trave alla Winkler, ecc.).

In ogni caso, occorre tenere cautelativamente in considerazione le incertezze derivanti da una conoscenza più o meno limitata del sottosuolo: la modellazione diretta dell'interazione terreno struttura richiede un adeguato livello di approfondimento conoscitivo, senza il quale l'utilizzo di modelli più o meno complessi (sistema di vincolo con modelli di risposta lineare o non lineare nelle diverse direzioni) può risultare non correttamente calibrato e non cautelativo. Specifiche considerazioni tecniche occorrono soprattutto nel caso in cui l'inserimento dell'interazione terreno-struttura comporti una sostanziale riduzione delle azioni risultanti a seguito della riduzione della rigidità del sistema.

3.3 Analisi strutturale e valutazione della domanda

L'analisi strutturale, locale o globale, permette l'individuazione della domanda (in termini di resistenza, deformazione, spostamenti in funzione del tipo di elemento, analisi e stato limite considerato) agente su ciascun elemento o porzione strutturale da sottoporre a valutazione della sicurezza. Le metodologie per l'esecuzione delle analisi strutturali e per la determinazione della domanda sono quelle previste dalle normative tecniche vigenti.

3.3.1 Analisi locale

L'analisi strutturale locale può essere eseguita secondo le metodologie esplicitate dall'interno delle norme tecniche per le costruzioni e nella circolare applicativa; il ricorso a metodologie di comprovata validità è comunque possibile se adeguatamente giustificato.

La scelta dell'approccio impiegato (ad esempio cinematico lineare o non lineare) è effettuata tenendo presente il grado di conoscenza raggiunto sul manufatto o sulle singole parti interessate nonché in funzione degli obiettivi medesimi dell'analisi e della natura del fabbricato, elemento o sottostruttura che viene sottoposto a verifica. Le porzioni di manufatto interessate dalla potenziale attivazione del meccanismo locale con riferimento all'edificio nel suo complesso e le azioni (o le combinazioni di azioni) che portano al cinematicismo possono essere individuate a

fronte dei risultati del rilievo geometrico-strutturale e delle indagini in situ e dell'analisi critica del quadro fessurativo e dei dissesti.

3.3.2 Analisi globale

I modelli globali realizzati secondo le indicazioni riportate al paragrafo precedente possono essere impiegati per l'esecuzione di diverse tipologie di analisi globali, lineari o non lineari, statiche o dinamiche. Il ricorso ad una specifica tipologia di analisi si effettua tenendo presente quanto ricavato dalla fase conoscitiva e gli obiettivi medesimi della valutazione della sicurezza. La scelta tra analisi lineare o non lineare è funzione, inoltre, del valore del coefficiente di sensitività ai fenomeni del II ordine, calcolato con riferimento a quanto previsto dalle NTC2018.

L'analisi statica lineare si può eseguire se è possibile schematizzare la struttura (sia essa di c.a. o di muratura) come un sistema ad un solo grado di libertà, caratterizzata cioè da un solo fondamentale modo di vibrare. In tal caso, accertate le condizioni base che permettono l'applicabilità del metodo (e.g. regolarità in altezza, periodo proprio entro i limiti previsti), il valore del periodo proprio T_1 – necessario per il calcolo delle forze di piano agenti in ciascuna delle due direzioni principali del fabbricato – può essere definito mediante il ricorso a formulazioni di comprovata validità, fornite da normativa o da ulteriori fonti di letteratura.

I risultati dell'analisi modale possono essere impiegati per valutare la correttezza e l'affidabilità stessa del modello impiegato, nonché per individuare la presenza di elementi non idoneamente collegati, punti di criticità e/o discontinuità nel comportamento strutturale, ecc. L'analisi modale permette il riconoscimento delle zone del manufatto coinvolte in modi di vibrare torsionali che possono influire sul comportamento strutturale globale.

Qualora gli effetti del secondo ordine siano invece rilevanti, si ricorre ad analisi di tipo non lineare. L'analisi statica non-lineare (indicato sovente quale metodo di riferimento per strutture esistenti in muratura) si effettua secondo la metodologia prevista da normativa. La schematizzazione del sistema equivalente ad un solo grado di libertà, impiegata per la successiva verifica globale, si esegue in accordo a quanto previsto dalla Circ. 7/2019 o facendo ricorso a formulazioni scientifiche di comprovata validità.

L'esecuzione di analisi dinamiche non lineari è, solitamente, meno frequente a causa della difficoltà del metodo e dell'elevato onere computazionale correlato, e segue in ogni caso le specifiche riportate nelle NTC2018.

Attraverso le analisi numeriche è possibile definire la domanda agente sul manufatto nel suo complesso e sui singoli elementi strutturali e non strutturali. La domanda è valutata, in accordo a normativa, in termini di resistenza, deformazione, spostamento in relazione allo stato limite per cui si eseguono le verifiche, al tipo di analisi e al meccanismo considerato. Ad esempio, nel caso di analisi lineari, la domanda sugli elementi strutturali – a seconda dello stato limite considerato – può essere valutata mediante le caratteristiche della sollecitazione (M , V , N) in termini di resistenza o in termini di deformazioni/spostamenti; in presenza di analisi di tipo non lineare, la domanda sugli elementi strutturali si valuta in deformazione o resistenza rispettivamente nel caso di elementi/meccanismi duttili o fragili. Per la domanda a livello globale si possono altresì considerare gli spostamenti in corrispondenza di un punto significativo.

3.4 Valutazione della capacità e verifiche di sicurezza

La valutazione della sicurezza delle costruzioni esistenti si esegue con riferimento a quanto riportato nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018). Per le verifiche di sicurezza per edifici facenti parte del patrimonio culturale tutelatosi può inoltre fare utile riferimento a quanto riportato nella *"Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 9 febbraio 2011 Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008"*.

In linea generale, la valutazione di sicurezza consiste nel confronto tra la capacità, agente a livello globale di struttura o localmente sul singolo elemento o porzione significativa di manufatto e la corrispondente domanda derivante dall'analisi (valutata secondo quanto specificato al paragrafo precedente).

La capacità di ciascun elemento/meccanismo si valuta con riferimento alle indicazioni di normativa o a fonti di comprovata validità; ad esempio, per il calcolo della capacità in termini di rotazione degli elementi esistenti di calcestruzzo armato si possono impiegare le formulazioni empiriche o sperimentali riportate all'interno della circolare applicativa (Circ. n.7/2019) o le

espressioni dell'Eurocodice 8 (EN1998-3:2005) - nelle quali si introducono esplicitamente parametri quali la curvatura e la lunghezza di cerniera plastica - motivando opportunamente il ricorso dall'una o dall'altra formulazione.

Le verifiche di sicurezza si effettuano sugli **elementi strutturali** (travi, pilastri, nodi trave-pilastro, setti, pareti murarie, travi di accoppiamento e fasce di piano, struttura di fondazione, orizzontamenti e struttura di copertura), sugli **elementi non strutturali** (tamponamenti e tramezzi, controsoffitti, ecc.) e, laddove necessario, sugli impianti. Il tipo di verifica da eseguire è definito, secondo normativa, in funzione dello stato limite considerato e della classe d'uso della costruzione medesima.

Nel caso in cui si siano riscontrati elementi di criticità locali (ad esempio, elementi spingenti, tamponamenti di grande luce o non collegati, elementi pesanti anche di decorazione, oggetti, fregi, cornicioni, parapetti non ammortati, ecc.) è necessario che essi siano opportunamente indicate, segnalate e adeguatamente tenute in considerazione durante l'effettuazione delle verifiche. In presenza di rilevanti criticità locali - come ad esempio nel caso di elementi di tamponamento di grande luce, non collegati o inadeguatamente collegati alla struttura portante - si possono eseguire le verifiche previste per gli elementi non strutturali riportate nella attuale normativa tecnica motivando le semplificazioni e le assunzioni effettuate per il calcolo dell'azione agente, i vincoli impiegati, ecc.

Al fine di consentire una rapida lettura ed interpretazione di quanto ottenuto dalle verifiche di sicurezza, i risultati possono essere riportati in forma di rapporto Capacità/ Domanda (C/D): questo permette di comprendere quali verifiche non forniscano risultati soddisfacenti (rapporti C/D inferiori all'unità) ed altresì di quanto il risultato si discosta dai requisiti. È opportuno motivare adeguatamente e criticamente i risultati delle valutazioni di sicurezza, correlandoli con le caratteristiche geometrico-strutturali dell'edificio e dei suoi elementi e con le criticità rilevate (e.g. dissesti, carenza di armatura, assenza di adeguato ammortamento, proprietà meccaniche del materiale insufficienti, ecc.).

Per sintetizzare i risultati delle verifiche di sicurezza, le NTC2018 per le costruzioni introducono specifici coefficienti che permettono di comprendere se la costruzione e le sue singole componenti hanno capacità sufficiente per sopportare la domanda prevista da normativa. Per quanto riguarda le valutazioni sismiche si può calcolare il **rapporto ζ_E** tra l'azione sismica massima sopportabile dalla struttura (*capacità*) e l'azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione sul medesimo suolo e con le medesime caratteristiche (*domanda*). Il soddisfacimento dei requisiti di sicurezza nei confronti delle combinazioni di azioni non sismiche, è altresì definito mediante il **rapporto $\zeta_{v,i}$** tra il valore massimo del sovraccarico verticale variabile sopportabile dalla parte *i*-esima della costruzione (*capacità del singolo elemento/meccanismo*) e il valore del sovraccarico verticale variabile che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione (*domanda*). Questi coefficienti possono essere opportunamente impiegati per mostrare e analizzare criticamente il risultato delle valutazioni di sicurezza.

3.5 Relazioni ed elaborati grafici

Al termine delle fasi sopra riportate, si può redigere una relazione contenente informazioni relative ai criteri di modellazione, all'analisi strutturale ed alla valutazione della sicurezza. Si distingue, in particolare:

- La relazione sulla modellazione, analisi e verifica della sicurezza, che descrive le assunzioni effettuate nella modellazione, l'elaborazione del modello, i risultati delle analisi strutturali e delle valutazioni di sicurezza eseguite.
- La relazione sulla modellazione sismica, che contiene il modello sismico del suolo e lo studio di risposta sismica locale, se presenti ed elaborati (se necessaria).
- La relazione sulle strutture di fondazione, che ne contiene la descrizione e i risultati delle verifiche di sicurezza (se necessaria).
- La relazione geotecnica, che descrive il modello geotecnico del suolo di fondazione a fronte delle indagini geotecniche opportunamente effettuate (se necessaria).

3.5.1 Relazione sulla modellazione, analisi e verifica della costruzione

La relazione sull'analisi e verifica della costruzione descrive le assunzioni effettuate per l'elaborazione dei modelli numerici di calcolo impiegati per la successiva analisi strutturale, in

funzione – laddove possibile – di quanto riscontrato dai rilievi in situ. La relazione spiega le motivazioni alla base della scelta dell'analisi strutturale effettuata e ne riassume i risultati derivanti, esplicita la domanda agente su ciascun elemento strutturale, non strutturale o porzione di manufatto e la corrispondente capacità, nonché i risultati delle valutazioni di sicurezza.

A titolo esemplificativo e non esaustivo, i contenuti della relazione di calcolo possono essere sintetizzati come di seguito riportato.

1. Riferimenti normativi

2. Inquadramento generale della strategia di modellazione ed analisi. Le scelte che hanno portato a effettuare una modellazione locale piuttosto di una globale, lineare o non lineare sono contenute all'interno della relazione sulla modellazione, analisi e verifica della costruzione, con esplicite motivazioni. Ad esempio, nel caso di modellazione locale è opportuno fornire indicazioni in merito alla selezione dei meccanismi di collasso analizzati, anche in base ai risultati dell'analisi conoscitiva; in caso di modellazione globale, analogamente, occorre giustificare l'assunzione di un comportamento di insieme del manufatto sulla base delle caratteristiche strutturali e della disposizione degli elementi, dei collegamenti, ecc. La scelta tra lineare e non lineare può altresì essere giustificata in relazione al livello conoscitivo ed al grado di approfondimento raggiunto sul manufatto, comprensivo delle caratteristiche dei materiali e dei dettagli costruttivi, ecc.

3. Valutazione delle azioni impiegate. Le azioni calcolate (permanenti, variabili, eccezionali, sismiche) possono essere riportate in forma tabellare e impiegando, laddove lo si ritenga necessario, opportuni schemi che illustrino le ipotesi fatte nella definizione dei carichi agenti. Nel caso in cui si impieghi un'analisi non lineare, è opportuno riportare le distribuzioni di forze impiegate per l'esecuzione dell'analisi *pushover* e le metodologie di selezione degli accelerogrammi impiegati nel caso di analisi *time-history* o dinamiche incrementalì.

Gli spettri di piano impiegati, eventualmente, per la valutazione dei meccanismi locali sono riportati facendo riferimento alla metodologia di modellazione impiegata (da normativa o proveniente da fonti scientifiche di comprovata validità).

4. Definizione delle combinazioni di carico e degli stati limite considerati. I valori dei coefficienti amplificativi delle azioni diversi da quelli previsti dalle attuali NTC2018 possono essere impiegati purché adeguatamente e ragionevolmente motivati.

5. Descrizione della modellazione strutturale.

5.1 Descrizione dei modelli locali realizzati (se presenti), necessaria per permettere la valutazione della affidabilità dell'analisi e delle successive verifiche di sicurezza. Ai fini esemplificativi (ma non necessariamente esaustivi) si possono fornire indicazioni relative a:

- **Elementi/porzioni di manufatto considerate**, modellate ed analizzate poiché soggette a meccanismi locali, indicando i fattori geometrici e strutturali che ne causano la potenziale attivazione (e.g. mancanza di collegamenti, presenza di spinte orizzontali significative, ecc.) e localizzandoli all'interno della costruzione.
- **Schematizzazione strutturale** impiegata per la descrizione della catena cinematica attivabile per ciascun meccanismo considerato.
- Definizione dei **modelli costitutivi dei materiali**. Indicazione dei legami costitutivi impiegati, in termini di resistenza, duttilità ed eventuale degrado/danneggiamento, necessaria soprattutto nel caso di modellazioni non lineari. Indicazione delle eventuali semplificazioni adottate (es. resistenza a compressione infinita e a trazione nulla per la muratura, presenza/assenza di scorrimento in corrispondenza dei giunti, ecc.)
- Definizione dei **vincoli** impiegati per rappresentare l'interazione dell'elemento, porzione o sottostruttura considerata con le zone adiacenti del manufatto e con il terreno, per simulare la presenza di paramenti scollegati o altresì opportunamente connessi. Nel caso in cui si modelli direttamente l'**interazione terreno-struttura**, occorre fare riferimento alle prove per la caratterizzazione geotecnica del sottosuolo ed alle elaborazioni effettuate per la modellazione del terreno.

5.2 Descrizione del modello globale realizzato (se presente), necessaria per permettere la valutazione dell'affidabilità dell'analisi e delle successive verifiche di sicurezza. Ai fini esemplificativi (ma non necessariamente esaustivi) si possono fornire indicazioni relative a:

- **Geometria degli elementi strutturali e schema strutturale**, dedotte dal processo conoscitivo.
- **Strategia generale di modellazione** (e.g. lineare o non lineare). Occorre motivare il ricorso al tipo di modellazione selezionata (e.g. lineare o non lineare, ad elementi finiti,

a telaio equivalente o per macro-elementi, a plasticità concentrata o diffusa, inserendo gli elementi non strutturali in termini di sola massa o di massa e rigidezza, ecc.).

- Individuazione degli **elementi non direttamente modellati** e motivazione delle scelte effettuate.
 - Descrizione della **tipologia di elemento** impiegato per la modellazione degli elementi strutturali verticali e orizzontali (e.g. travi, pilastri, setti in c.a., setti murari, orizzontamenti, copertura, ecc.).
 - Strategia di modellazione impiegata per gli **elementi non strutturali** (e.g. solo in termini di massa o in termini di massa e rigidezza) e eventuale descrizione dei modelli adottati.
 - Definizione dei **modelli costitutivi dei materiali (o degli elementi)**. Indicazione dei legami costitutivi impiegati, in termini di resistenza, duttilità ed eventuale degrado/danneggiamento, necessaria soprattutto nel caso di modellazioni non lineari. Indicazione delle eventuali semplificazioni adottate (es. resistenza a compressione infinita e a trazione nulla per la muratura, presenza/assenza di scorrimento in corrispondenza dei giunti, ecc.)
 - Definizione dei **vincoli esterni e vincoli interni** (questi ultimi qualora presenti), definiti in modo tale da rispecchiare i risultati dei rilievi in situ ed il tipo di collegamento tra struttura in elevazione e struttura di fondazione, tra solaio e strutture verticali ecc. Qualora si modelli in maniera diretta l'interazione terreno-struttura, occorre fare riferimento alle prove per la caratterizzazione geotecnica del sottosuolo ed alle elaborazioni effettuate per la modellazione del terreno.
- 6. Scelta della tipologia di analisi impiegata.** Il ricorso alla metodologia selezionata può essere giustificato in funzione delle caratteristiche della struttura, del livello conoscitivo raggiunto durante la fase di indagine/rilievo e in virtù degli obiettivi medesimi dell'analisi.
- 7. Risultati dell'analisi strutturale.** Le informazioni provenienti dall'analisi variano in relazione al fatto che riguardino l'intero manufatto o alcune sue parti e in funzione della tipologia (lineare o non lineare, statica o dinamica). Per permettere la valutazione dell'efficacia del metodo applicato e l'attendibilità dei risultati ottenuti occorre riportare alcuni parametri fondamentali. Ad esempio, nel caso di analisi di tipo lineare, si riportano indicazioni relative alle masse di piano calcolate secondo normativa, ai risultati dell'analisi modale in termini di periodi/frequenze proprie, masse partecipanti e deformate modali per i modi ritenuti significativi, ai valori del periodo proprio della costruzione nelle due direzioni ed alle formulazioni impiegate per stimarlo (analisi statica lineare), le deformate associate alle principali combinazioni di carico impiegate, il valore del coefficiente di sensitività ai fenomeni del II ordine. Nel caso di analisi statica non lineare è opportuno altresì fornire le curve di capacità del sistema a molti gradi di libertà (MDOF) per ciascuna distribuzione di forza e per ciascuna delle due direzioni fondamentali del fabbricato nonché quelle ricavate per il sistema ad un solo grado di libertà equivalente.
- 8. Valutazione della domanda.** La domanda è definita conformemente a quanto riportato all'interno delle norme tecniche per le costruzioni, in termini di resistenza, deformazione, spostamento in funzione dello stato limite considerato e della tipologia medesima di analisi. Ad esempio, nel caso di analisi lineare si possono riportare i diagrammi delle sollecitazioni (M, V, N) delle principali combinazioni di carico e la corrispondente definizione della domanda in termini di resistenza nonché i valori della domanda in termini di spostamento. Nel caso di analisi di tipo non lineare, si può riportare la domanda globale in termini di spostamento sul manufatto e la domanda locale sugli elementi strutturali in termini di deformazioni degli elementi/meccanismi duttili e le caratteristiche della sollecitazione per gli elementi/meccanismi fragili.
- 9. Valutazione della capacità.** La capacità di ciascuna tipologia di elemento/meccanismo strutturale può essere valutata facendo esplicito riferimento alle formulazioni adottate (di normativa o provenienti da fonti scientifiche di comprovata validità) ed alle assunzioni o semplificazioni impiegate.
- 10. Risultati delle valutazioni di sicurezza.** I risultati possono essere espressi mediante l'impiego di rapporti C/D (capacità/domanda) ottenuti per ciascuna verifica, stato limite, combinazione di carico ed elemento sottoposto a valutazione di sicurezza.
- 11. Definizione e calcolo degli indicatori di rischio.** Facendo riferimento a quanto riportato nelle NTC2018, si possono impiegare due diversi coefficienti: (1) il rapporto ζ_E per quanto riguarda le

verifiche in combinazione sismica e (2) i rapporti $\zeta_{v,i}$ come sintesi delle valutazioni di sicurezza in combinazione statica.

12. Criticità riscontrate a seguito dell'esecuzione delle verifiche sui diversi elementi strutturali e/o non strutturali opportunamente motivate e giustificate, nonché localizzate all'interno del manufatto.

3.5.2 Relazione sulla modellazione sismica del terreno

La relazione sulla modellazione sismica contiene il modello sismico (comprensivo della caratterizzazione dei parametri dinamici dei terreni) e lo studio di risposta sismica locale (in forma semplificata o rigorosa).

La determinazione dell'azione sismica di progetto si effettua a partire dalla pericolosità sismica di base, mediante specifiche analisi della risposta sismica locale come indicato al par. 7.11.3 delle NTC2018. In assenza di tali analisi, in funzione delle caratteristiche dell'opera in progetto, si può fare riferimento ad un approccio semplificato basato sull'individuazione della categoria di sottosuolo, secondo quanto più dettagliatamente specificato al §3.2 delle NTC2018.

Nel caso in cui non siano realizzate analisi della risposta sismica locale con approccio rigoroso, tale elaborato può essere omesso e in tal caso i contenuti della relazione sulla modellazione sismica saranno inclusi all'interno della relazione geologica di cui al §2.6.2

3.5.3 Relazione sulle strutture di fondazione

La relazione sulle fondazioni illustra, sulla base delle tipologie e delle caratteristiche dimensionali delle strutture di fondazione, le verifiche di sicurezza su di esse effettuate in condizioni sia statiche sia sismiche.

La relazione sulle fondazioni può non essere presente per alcune tipologie di opere (e.g. nel caso di diaframmi o altri tipi di opere di sostegno) e può essere omessa in caso di non effettuazione della valutazione della sicurezza, nei casi previsti dal §8.3 delle NTC2018 oppure nel caso in cui tali verifiche siano contenute nella relazione geotecnica di cui al §3.5.4.

3.5.4 Relazione geotecnica

La relazione geotecnica contiene e riporta in maniera adeguatamente motivata le assunzioni effettuate per la definizione del modello geotecnico fornendo, sulla base dei risultati delle indagini, una adeguata parametrizzazione geotecnica dei terreni e/o geomeccanica degli ammassi rocciosi. Ad esempio, a titolo esemplificativo ma non esaustivo, la relazione geotecnica contiene le seguenti informazioni:

1. Definizione del volume geotecnico significativo, sulla base delle indicazioni derivanti dal modello geologico.
2. Descrizione delle prove geognostiche, delle prospezioni sismiche delle indagini geotecniche e geomeccaniche possedute, esistenti e/o di nuova realizzazione e loro interpretazione
3. Caratterizzazione e modellazione geotecnica dei terreni e/o geomeccanica degli ammassi rocciosi interagenti con l'opera nell'ambito del volume significativo.
4. Le verifiche di capacità portante delle fondazioni superficiali e profonde (in condizioni statiche e dinamiche).

Le caratteristiche definite nel modello geologico del sito e quelle definite nel modello geotecnico occorre siano tra loro coerenti, evidenziando la corrispondenza tra i parametri assunti nella relazione geotecnica e le ipotesi/considerazioni effettuate nella relazione geologica.

La relazione geotecnica può essere omessa a condizione che:

- la costruzione non presenti importanti dissesti attribuibili a cedimenti attivi delle fondazioni o importanti dissesti della stessa natura che si siano prodotti nel passato.
- Non 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.

- Non siano possibili fenomeni di liquefazione del terreno di fondazione dovuti alle azioni sismiche di progetto.

Ai fini della verifica delle suddette condizioni, occorre che il tecnico incaricato fornisca considerazioni specifiche nell'ambito degli elaborati geologici e sismici anche con riferimento alle indagini specialistiche.

Elenco degli elaborati

Si riportano di seguito gli elaborati da fornire a fronte di una valutazione di sicurezza su un manufatto esistente, con una breve descrizione dei contenuti.

1. **Relazione tecnico conoscitiva**, la quale contiene:

- La descrizione generale del manufatto, corredata di documentazione fotografica, e la sua collocazione nel contesto considerato.
- L'elenco della documentazione originaria di progetto (se reperita) e i contenuti.
- I risultati ottenuti dall'analisi storico-critica della documentazione reperita.
- La definizione dello schema strutturale del manufatto.
- L'indicazione delle modalità di esecuzione delle indagini in situ.
- L'organizzazione delle campagne di rilievo geometrico-strutturale in situ.
- La descrizione delle caratteristiche degli elementi costruttivi.
- L'organizzazione delle campagne di indagine in situ per la definizione dei dettagli costruttivi ed i risultati ottenuti.
- La descrizione dei dissesti rilevati, con adeguata documentazione grafica.
- La descrizione delle criticità locali e delle vulnerabilità rilevate, con adeguata documentazione grafica.
- L'individuazione delle aree non indagate (fornendo motivazione del mancato rilievo).
- L'organizzazione delle campagne di caratterizzazione meccanica dei materiali e delle strutture.
- L'illustrazione delle tecniche impiegate per il trattamento/elaborazione dei dati sperimentali ottenuti dalle prove.
- La definizione del livello di conoscenza raggiunto.
- La definizione delle caratteristiche meccaniche di calcolo dei materiali.

2. **Relazione geologico-tecnica del sito**, che contiene:

- La rappresentazione cartografica degli elementi geologici, geomorfologici e strutturali significativi.
- I caratteri stratigrafici, litotecnici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici e sismici di un intorno significativo dell'area in esame.
- Le indagini geognostiche effettuate.
- La descrizione del modello geologico di riferimento.

3. **Relazione sulla modellazione sismica del terreno (quando necessaria)**, che contiene:

- Il quadro di pericolosità sismica dell'area con eventuali indicazioni in riferimento agli studi di microzonazione sismica realizzati.
- L'indicazione della metodologia utilizzata (codice di calcolo per la modellazione oppure contesto di riferimento normativo per l'approccio semplificato).
- La parametrizzazione sismica del sottosuolo utilizzata (profilo o sezione di input delle modellazioni o valore di V_s dei vari litotipi e conseguente categoria di sottosuolo per l'approccio semplificato).
- Il metodo di definizione dei terremoti di input ed il numero di accelerogrammi utilizzato per le analisi con rappresentazione grafica degli stessi.
- L'illustrazione grafica e tabellare degli spettri di risposta risultanti dall'analisi e necessari per la stima dell'azione sismica relativa al progetto in esame.

4. **Relazione geotecnica (quando necessaria)**, che contiene:

- La definizione del volume geotecnico significativo.

- La descrizione delle prove geognostiche, delle prospezioni sismiche delle indagini geotecniche e geomeccaniche possedute, esistenti e/o di nuova realizzazione e loro interpretazione.
- La caratterizzazione e modellazione geotecnica dei terreni e/o geomeccanica degli ammassi rocciosi interagenti con l'opera nell'ambito del volume significativo.
- Le verifiche del potenziale di liquefazione del terreno.
- Le verifiche di stabilità del complesso opera/pendio se in presenza di problematiche di versante.
- Le verifiche di capacità portante delle fondazioni superficiali e profonde (in condizioni statiche e dinamiche).
- Gli elaborati grafici e sezioni geotecniche rappresentative.

5. Relazione sulle fondazioni (quando necessaria), che contiene:

- La descrizione della tipologia e della geometria delle strutture di fondazione.
- Le verifiche di sicurezza delle fondazioni in condizioni statiche e sismiche.
- Ove previsto, le verifiche di stabilità globale del complesso terreno-struttura.

6. Relazione sulla modellazione, analisi e verifica della costruzione, che contiene:

- I riferimenti normativi seguiti per le valutazioni di sicurezza.
- L'inquadramento generale della strategia di modellazione ed analisi.
- La valutazione delle azioni impiegate.
- La definizione delle combinazioni di carico e degli stati limite considerati.
- La descrizione dei modelli strutturali. In particolare, per i modelli locali occorre definire gli elementi/porzioni di manufatto considerate, la schematizzazione strutturale, i modelli costitutivi dei materiali, i vincoli esterni, interni e l'interazione terreno-struttura. Per i modelli globali occorre definire la geometria degli elementi strutturali e lo schema strutturale, la strategia generale di modellazione, la tipologia di elemento struttura e non strutturale impiegata nella modellazione, i modelli costitutivi dei materiali (o degli elementi), i vincoli esterni, interni e l'interazione terreno-struttura
- La scelta motivata della tipologia di analisi impiegata.
- I risultati dell'analisi strutturale.
- La valutazione della domanda agente a livello di elemento/struttura.
- La valutazione della capacità e formulazioni adottate nel calcolo.
- I risultati delle valutazioni di sicurezza, ad esempio in termini di rapporto C/D.
- La definizione e calcolo degli indicatori di rischio (rapporto ζ_E e rapporti $\zeta_{v,i}$ per i diversi elementi strutturali).
- L'analisi delle criticità riscontrate a seguito delle valutazioni di sicurezza.

7. Fascicolo dei calcoli

8. Elaborati grafici

9. Scheda di sintesi della verifica sismica (secondo il formato e gli standard definiti a livello nazionale – in ambito OPCM 3274/2003 e successivi aggiornamenti).

10. Elenco degli elaborati presentati