



ALLEGATO G

*ISPEZIONI SPECIALI E PROGETTO
DELLA CONOSCENZA FINALIZZATI
ALLA VERIFICA ACCURATA DI PONTI E
VIADOTTI ESISTENTI INTERAGENTI
CON FENOMENI FRANOSI*

1 Indice

1	PREMESSA.....	1
2	TIPOLOGIE DI MOVIMENTI FRANOSI INTERAGENTI CON PONTI E VIADOTTI	3
3	APPROCCIO MULTILIVELLO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO FRANA.....	6
4	L'APPROFONDIMENTO DOCUMENTALE	9
5	ANALISI CRITICA DELLO STATO DELL'OPERA	10
6	ISPEZIONI SPECIALI E MODELLI PRELIMINARI	11
6.1	Ispezioni speciali	11
6.2	Modello geologico preliminare	13
6.3	Modello geotecnico preliminare	14
7.	PROGETTO DELLA CONOSCENZA PER LA VERIFICA ACCURATA DELLA SICUREZZA.....	14
7.1.	Sicurezza dei ponti e viadotti interagenti con frane	14
7.2	Indagini	16
7.3	Modello geologico di dettaglio	17
7.4	Modello geotecnico di dettaglio	17
8.	PROGRAMMAZIONE DELLE INDAGINI GEOLOGICHE, GEOFISICHE E GEOTECNICHE.....	18
8.1	Indagini e rilievi preliminari	18
8.2	Indagini minime per le fondazioni su pali di cui alle NTC 2018	19
8.3	Indagini sismiche	20
9.	MONITORAGGIO.....	21
10.	BIBLIOGRAFIA.....	21

1 PREMESSA

Le «*Linea Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti*», di seguito indicate come LLGG, sono state approvate dall'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici in data 17.04.2020 e successivamente aggiornate sempre dall'Assemblea Generale in data 10.11.2021.

La versione aggiornata delle LLGG è stata adottata dal DM 204 dell'1.7.2022, che sostituisce l'allegato A di cui al precedente Decreto del 17 dicembre 2020, n. 578. L'art.1 del DM 204/2022 stabilisce che le LLGG “assicurano l'omogeneità della classificazione e gestione del rischio, della valutazione della sicurezza e del monitoraggio dei ponti, viadotti, rilevati, cavalcavia e opere similari, esistenti lungo strade statali o autostrade gestite da Anas S.p.A. o da concessionari autostradali.” L'art. 2 stabilisce che le LLGG siano “adottate anche in relazione ai ponti, viadotti, rilevati, cavalcavia e opere similari esistenti lungo infrastrutture stradali gestite da enti diversi da Anas S.p.A. o da concessionari autostradali”.

Come previsto dall'art.3 dello stesso DM 204/2022, Ansisa ha successivamente emanato le “*Istruzioni Operative per l'applicazione delle Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti*”, che sono state adottate con Decreto del Presidente del CSLPP del 21 settembre 2022.

Le LLGG definiscono una procedura multilivello e multi-obiettivo per la gestione del rischio dei ponti esistenti e definiscono i requisiti e le indicazioni relative al sistema di sorveglianza e monitoraggio. L'approccio multilivello prevede, al cosiddetto Livello 2, la definizione, per ciascun manufatto di attraversamento, di una Classe di Attenzione, in relazione ai vari rischi cui il ponte o viadotto può essere assoggettato, fra cui nello specifico, quello relativo al Rischio Frane.

L'applicazione delle LLGG porta, quindi, nel Livello 2 alla definizione di una Classe di Attenzione relativa ai *Fenomeni Franosì*, dove con questo termine si intendono l'insieme dei fenomeni di instabilità di versante e più, in generale, di fenomeni gravitativi, che possono interessare il ponte o il viadotto, quali frane in terra e roccia, i crolli, la caduta massi, i ribaltamenti, i flussi di detrito, le valanghe di roccia e di ghiaccio nonché spandimenti e deformazioni gravitative profonde. La Classe così ottenuta viene quindi combinata con la Classe di Attenzione Idraulica, quella Strutturale e Fondazionale e quella Sismica per determinare la Classe di Attenzione complessiva dell'opera.

I ponti con Classe di Attenzione complessiva Alta sono direttamente assoggettati all'esecuzione di valutazioni accurate, previste dal Livello 4 dell'approccio multilivello. Alle stesse valutazioni accurate possono essere sottoposti i ponti con Classe di Attenzione complessiva Medio-Alta o Media, a seguito dell'esito delle valutazioni preliminari di Livello 3.

Si prevedono valutazioni di Livello 4 anche per le opere che, pur avendo una Classe di Attenzione complessiva non Alta, manifestino condizioni di particolare criticità rilevate in fase di approfondimento, nell'ambito delle cosiddette *Ispezioni Speciali*. Nel caso dei *ponti in calcestruzzo armato precompresso a cavi post-tesi*, così come in quello dei *ponti in aree ad evidenza di fenomeni alluvionali, erosionali e franosi, o riconosciute ad elevato rischio idrogeologico, con evidenze di possibile interferenza con la struttura*, le LLGG impongono infatti di eseguire apposite '*Ispezioni Speciali*' (paragrafo 3.6 delle LLGG). L'esito di tali ispezioni è quello di determinare se risulti necessario procedere con l'esecuzione delle valutazioni di Livello 4 oppure se si possa limitarsi alle operazioni previste fino al Livello 2.

Mentre per le ispezioni speciali strutturali esiste una definizione molto dettagliata dei casi in cui sia necessario effettuarle, per quanto riguarda il rischio frane la definizione risulta decisamente più generica. Inoltre, se per le ispezioni speciali dei ponti a cavi post-tesi sono fornite indicazioni specifiche e una scheda apposita, nel caso del rischio frane queste indicazioni e i relativi strumenti gestionali sono assenti.

È quindi necessario, in via preliminare, stabilire chiaramente quando si ritiene opportuno effettuare delle ispezioni speciali, tenendo presente che in situazioni evidentemente molto critiche è già necessario passare direttamente al livello 4 di intervento.

Questa definizione più precisa permetterebbe una gestione più efficace e mirata del rischio frane, allineandola agli standard già esistenti per altri tipi di ispezioni speciali.

Nell'ambito specifico del rischio frana, le ispezioni speciali devono pertanto permettere di accertare una eventuale condizione di difettosità o di sofferenza in atto o potenziale della struttura correlabile alla presenza di una frana o più in generale di un fenomeno gravitativo, la interazione con una frana potenziale o permettere di stimare, con un livello accettabile di affidabilità, la possibile interazione di fenomeni a cinematisma rapido, come la caduta massi, i ribaltamenti e i flussi di terra o detrito, che potrebbero impattare la struttura a seguito di attivazione. Potrebbero eventualmente dare evidenza dell'esigenza di interventi urgenti sul territorio circostante il ponte, ancora precedentemente ed indipendentemente dalla esecuzione della verifica di livello 4.

Qualora risulti necessaria la verifica accurata di Livello 4, si dovrà verificare l'effettiva condizione di sicurezza del ponte e la rispondenza del manufatto alla normativa attuale (NTC 2018 e Circolare n.7/2019 CSLLPP). In caso di mancata rispondenza, occorrerà procedere alla valutazione degli eventuali conseguenti provvedimenti per la messa in sicurezza dell'opera.

Nel caso specifico di un'opera interagente con una frana, la verifica di Livello 4 richiede, tra le altre cose, un adeguato livello di conoscenza delle caratteristiche geomorfologiche, geologiche, geotecniche e sismiche dell'area di interesse, oltre che del livello di interazione tra struttura e movimento franoso.

Particolare attenzione va posta ai problemi di interazione fra il ponte ed i fenomeni a cinematica veloce, come i crolli e gli attraversamenti di flussi di detrito o di terra, attraverso un coordinamento anche con gli approfondimenti legati al rischio idraulico, per le sollecitazioni impreviste che possono crearsi sugli elementi portanti del ponte.

Il presente documento, redatto nell'ambito del Consorzio FABRE, intende definire i criteri di massima che devono guidare il progetto della conoscenza, a partire dalle ispezioni speciali, per giungere, eventualmente, ad una verifica accurata della sicurezza di Livello 4 di un'opera interagente con una frana, anche di tipo potenziale.

2 TIPOLOGIE DI MOVIMENTI FRANOSI INTERAGENTI CON PONTI E VIADOTTI

La tradizionale classificazione dei movimenti franosi di Cruden e Varnes (1996), successivamente aggiornata da Hungr et al. (2013), individua i seguenti tipi di movimenti franosi:

1. CROLLO (*FALL*): distacco di terra, roccia, massi o ghiaccio da un pendio acclive. Lo spostamento lungo la superficie di distacco è nullo o limitato. Dopo il distacco il materiale si muove nell'aria per caduta libera, rimbalzo e rotolamento. La velocità è da rapida a molto rapida.
2. RIBALTAMENTO (*TOPPLE*): rotazione verso l'esterno del versante di una massa di terra o roccia, intorno ad un punto o un asse situato al di sotto del centro di gravità della massa spostata. Inizia lentamente, ma l'ultima parte del movimento può subire un'accelerazione improvvisa.
3. SCIVOLAMENTO (*SLIDE*): movimento verso la base del versante di una massa di terra o roccia che avviene in gran parte lungo una superficie di rottura o entro una fascia, relativamente sottile, di intensa deformazione di taglio. Lo scivolamento, nei limi e nelle argille, può essere di tipo rotazionale, planare o composito, da lento a rapido, o di tipo traslazionale nelle sabbie e ghiaie, che, molto spesso, si trasforma in flusso rapido. Nelle formazioni rocciose, lo scivolamento può essere di tipo rotazionale, da lento a moderatamente lento, di tipo planare/tridimensionale, solitamente estremamente rapido, o di tipo composito, da lento a rapido, o di tipo irregolare, solitamente molto rapido.
4. ESPANSIONE O SPANDIMENTO (*SPREAD*): nelle terre e nelle rocce, movimento conseguente all'estrusione e allo spostamento di un livello di materiale meno resistente sottostante. La

superficie di rottura non è una superficie di intensa deformazione di taglio. Nei mezzi granulari l'espansione può essere causata da liquefazione.

5. FLUSSO (*FLOW*): movimento distribuito in maniera continua all'interno della massa spostata. Le superfici di taglio sono multiple, temporanee e generalmente non vengono conservate. La distribuzione delle velocità nella massa in movimento è analoga a quella all'interno di un fluido viscoso. Si distingue tra valanga di ghiaccio/roccia estremamente rapida, *flowslide* di sabbia/limo/ghiaia, da molto rapido a estremamente rapido, *flowslide* di argilla sensibile, da molto rapida a estremamente rapido, *debris flow* da rapido a estremamente rapido, colata di fango, da rapida a molto rapida, valanga di detrito, da molto rapida a estremamente rapida e colata di terra, rapida o lenta o intermittente.
6. MOVIMENTI GRAVITATIVI (*SLOPE DEFORMATION*): Deformazione gravitazionale su larga scala di pendii, anche a grande profondità, che si manifesta con la presenza di scarpate, fessure e rigonfiamenti, non sempre con superfici di rottura completamente definite e con velocità estremamente lenta o difficilmente misurabile.

Con riferimento alle definizioni di velocità di spostamento, la Tabella 1 riassume le classi di velocità:

Classe	Definizione	Velocità (mm/s)	Velocità tipica
1	Estremamente rapida	$5 \cdot 10^3$	5 m/s
2	Molto rapida	$5 \cdot 10^1$	3 m/min
3	Rapida	$5 \cdot 10^{-1}$	1.8 m/h
4	Moderata	$5 \cdot 10^{-3}$	13 m/mese
5	Lenta	$5 \cdot 10^{-5}$	1.6 m/anno
6	Molto lenta	$5 \cdot 10^{-7}$	16 mm/anno
7	Estremamente lenta		

Tabella 1. Classi di velocità dei movimenti franosi.

La tipologia di fenomeni franosi può essere riassunta, principalmente, nei seguenti tipi:

1. Frane roto-traslazionali lente, comprese le espansioni laterali, che possono coinvolgere le pile, le spalle o l'intero ponte, sia trasversalmente che longitudinalmente (*Figura 1*).
2. Frane di dimensioni limitate che interessano localmente le pile o le spalle (*Figura 2*).
3. Flussi rapidi che possono impattare le pile, le spalle o l'intero ponte a seconda delle dimensioni del ponte, del volume movimentato e della velocità del fenomeno (*Figura 3*).
4. Caduta di massi con possibile impatto con parte dell'infrastruttura (*Figura 4*).

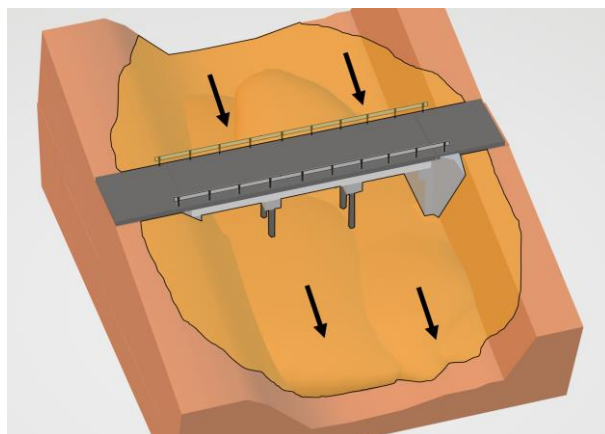
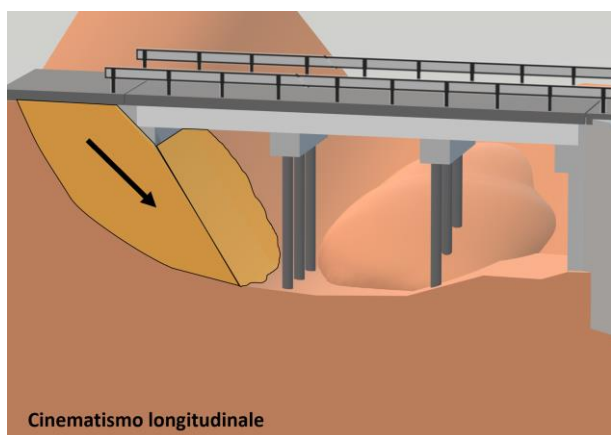


Figura 1. Frane roto-traslazionali lente, che possono coinvolgere le pile, le spalle o l'intero ponte, sia trasversalmente che longitudinalmente.



Figura 2. Frane di dimensioni limitate che interessano localmente le pile o le spalle.

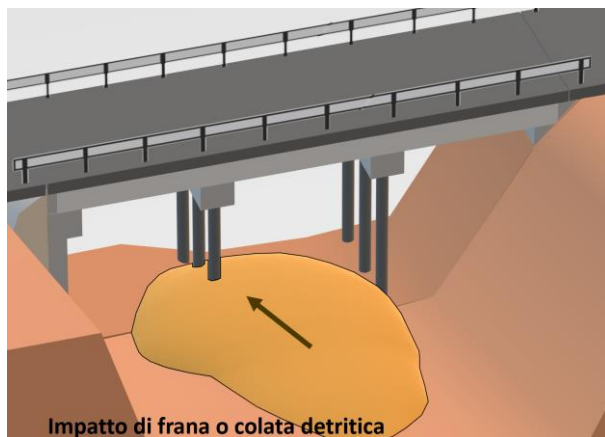
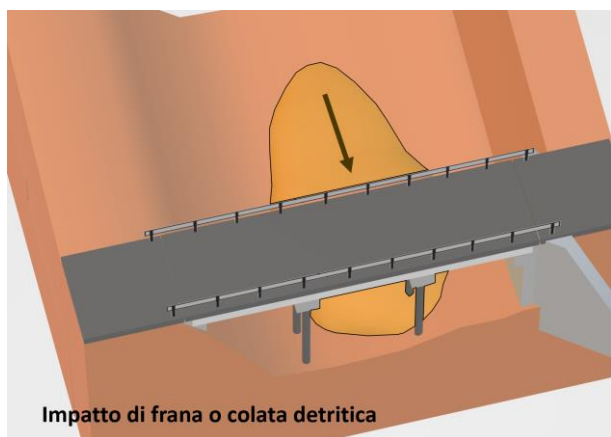


Figura 3. Flussi rapidi che possono impattare le pile, le spalle o l'intero ponte a seconda delle dimensioni del ponte, del volume movimentato e della velocità del fenomeno.

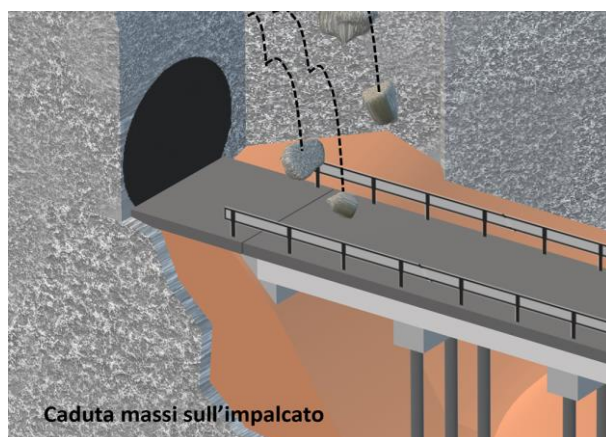


Figura 4. Caduta di massi con possibile impatto con parte dell'infrastruttura.

Le Istruzioni Operative per l'applicazione delle LLGG distinguono tra *interazione diretta*, nella quale la frana coinvolge direttamente una o più parti dell'infrastruttura, quali una o più fondazioni delle pile, una spalla o l'intera infrastruttura e *interazione indiretta*, che può essere di carattere occasionale o ripetuto nel tempo, nella quale la frana interagisce con il ponte solo a seguito della sua attivazione e movimentazione.

3 APPROCCIO MULTILIVELLO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO FRANA

Relativamente alla stima del rischio frana, le fasi di Livello 0, 1 e 2, definite dalle LLGG, sono finalizzate a stimare la Classe di Attenzione specifica dell'opera e richiedono una valutazione delle grandezze caratteristiche del fenomeno franoso basata essenzialmente sulle informazioni disponibili sul ponte (geometria e tipo di fondazioni, indagini geologiche, geofisiche e geotecniche dell'epoca della costruzione o durante la vita dell'opera, monitoraggi) e sul contesto geologico locale (carta geologica, catalogo IFFI, PAI, ecc.). Risultano inoltre fondamentali le evidenze ottenibili mediante un riscontro specifico in fase di ispezione di Livello 1, rivolta all'esecuzione di una valutazione preliminare del contesto in esame e alla verifica delle informazioni reperite in fase di censimento. L'approccio multilivello, pertanto, prevede l'esecuzione delle prime fasi di analisi (L0, L1 ed L2) per la totalità delle opere, con un approccio speditivo generalizzato, come illustrato nella *Figura 5*.

Il progetto della conoscenza e le valutazioni accurate della sicurezza di Livello 4 richiedono invece la definizione di un quadro più approfondito del fenomeno di interazione in atto o potenziale, nell'ambito del quale le ispezioni speciali, condotte da parte di valutatori esperti, rappresentano un passaggio fondamentale, nelle casistiche specificate nella parte che segue del documento.

Relativamente al rischio frana, infatti, i livelli di approfondimento con ispezione speciale e, successivamente, di tipo accurato (Livello 4) vengono rivolti a quelle opere che risultino in particolari

condizioni di criticità in atto o potenziale. Più nel dettaglio, le ispezioni speciali sono finalizzate ad approfondire la conoscenza di ponti e viadotti situati in aree caratterizzate da dissesti di varia natura, allo scopo di determinare se tali fenomeni franosi stiano generando o possano, in un futuro prossimo, generare nelle opere stesse una condizione di sofferenza/danneggiamento o potenziale collasso dell'opera stessa, dando evidenza dell'esigenza di interventi urgenti sul territorio circostante il ponte, già antecedentemente ed indipendentemente dalla esecuzione della verifica di livello 4.

L'obiettivo delle ispezioni speciali è quello di definire i modelli geologico e geotecnico preliminari, i quali, unitamente ad una valutazione esperta dei fenomeni gravitativi interagenti con l'opera concorreranno a valutare quali opere richiederanno la necessità della verifica accurata di livello 4, pur in assenza di una Classe di Attenzione complessiva Alta e quali invece possano proseguire con i soli Livelli 1 e 2. Ciò al fine di consentire una più efficiente prioritizzazione delle attività.

Il Livello 4 considera invece il massimo livello di approfondimento della conoscenza e di verifica della sicurezza dell'opera. La progettazione della campagna di indagini conoscitive e dei rilievi da svolgersi deve essere finalizzata a determinare i modelli geologico e geotecnico di dettaglio, necessari per lo svolgimento delle verifiche accurate, come previsto da normativa.

L'intero processo conoscitivo dell'opera finalizzato alla valutazione del rischio frana segue il diagramma di flusso di *Figura 5*, nel quale, a differenza del diagramma originale, sono rappresentate anche le quattro classi di attenzione, strutturale e fondazionale, sismica, idraulica e frane, quest'ultima evidenziata in carattere rosso, allo scopo di sottolineare il percorso logico da seguire. È altresì evidenziata con carattere in rosso, nel riquadro a sinistra concernente le ispezioni speciali, la parte relativa a fenomeni franosi o ad elevato rischio idrogeologico.

Come emerge dalla *Figura 5*, le operazioni di Livello 0, 1 e 2 sono svolte sulla totalità delle opere, allo scopo di determinare ciascuna Classe di Attenzione, tra cui, nel caso specifico, quella per il rischio frane. In funzione di tale risultato vengono determinate le operazioni che devono essere svolte successivamente. Si arriva al massimo livello di approfondimento (Livello 4) qualora la Classe di Attenzione complessiva dell'opera risulti Alta, indipendentemente dalla Classe di Attenzione specifica per il rischio frane. In questo caso, la valutazione accurata, come processo conoscitivo e di verifica, riguarderà pertanto la condizione della struttura, in relazione però anche alle possibili condizioni al contorno aggiuntive, tra cui, se presente, anche l'interazione con frane o, più in generale, con fenomeni gravitativi.

accurate relative alla struttura risulteranno funzione della Classe di Attenzione complessiva e della difettosità rilevata.

Il progetto della conoscenza per le verifiche accurate della sicurezza relativa alle frane segue quindi un approccio graduale, includendo le evidenze ottenute a seguito dell'esecuzione delle ispezioni speciali e tenendo conto dell'impegno e della onerosità delle indagini necessarie a definire compiutamente un modello geologico e geotecnico di dettaglio, in accordo con quanto indicato dalle NTC 2018 e della Circolare Esplicativa. In tale contesto è opportuno richiamare il contenuto del paragrafo 6.2.1 delle LLGG: *“L'approfondimento delle indagini sulla base dei risultati forniti dalle verifiche preliminari consente di incrementare e dettagliare la conoscenza in maniera organica e critica, evitando quanto non strettamente necessario e ridondante e focalizzando l'attenzione laddove necessario. 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, di fattori di confidenza e fattori parziali via via minori.”*

La periodicità delle ispezioni ordinarie è espressa nel paragrafo 7.4 delle LLGG. In relazione al tipo di dissesto, alle velocità caratteristiche e alle evidenze di interazione frana-struttura riscontrate è possibile ricorrere all'esecuzione di ispezioni straordinarie (7.4.2 delle LLGG), in particolar modo qualora un evento eccezionale come una frana o l'attivazione, a seguito di prolungati periodi di precipitazioni meteoriche, di movimenti di versante, possa aver influito o possa influire sulla stabilità dell'opera.

Nel caso in cui si sia rilevata un'interazione in atto o potenziale tra un dissesto e l'opera stessa, deve essere predisposto un apposito sistema di monitoraggio, finalizzato a rilevare l'evoluzione della condizione del ponte in relazione alla presenza della frana. Il monitoraggio deve inoltre garantire la raccolta di misure relative allo stato di attività del dissesto, alle sue caratteristiche geometriche, alle sue velocità caratteristiche e alle condizioni idrauliche che ne determinino l'attivazione. Maggiori dettagli sono inseriti nel capitolo 9 del presente documento.

4 L'APPROFONDIMENTO DOCUMENTALE

Il primo livello di valutazione del rischio previsto delle LLGG riguarda, come precedentemente ricordato, le operazioni di censimento (Livello 0).

Le Istruzioni Operative sottolineano l'importanza di questa prima attività: *“L'esecuzione del censimento e della raccolta di tutte le informazioni di possibile reperimento relative alle opere da analizzare è una delle fasi più importanti della metodologia multilivello proposta dalle LLGG. La quantità e la qualità dei dati raccolti influenzano infatti la buona riuscita del metodo e l'accuratezza nella determinazione della*

Classe di Attenzione.” (IO 4.5.1). Ciò nonostante, le LLGG evidenziano come l’attività di censimento di Livello 0 e l’accurata e completa raccolta di documentazione e informazioni di base sulle infrastrutture esistenti richieda inevitabilmente tempistiche lunghe, poco compatibili con la necessità e l’urgenza di conoscere e valutare, almeno visivamente, lo stato di conservazione delle opere. Da ciò nasce la necessità che, per facilitare e velocizzare l’organizzazione delle attività relative all’approccio multilivello proposto, gli enti gestori/proprietari stabiliscano un ordine, anche in assenza di tutte le informazioni da censimento, individuando le tratte viarie da analizzare prioritariamente (paragrafo 1.5 delle LLGG).

Non sempre, pertanto, il Livello 0 riesce a comprendere la totalità della documentazione realmente disponibile. Risulta quindi fondamentale, in fase di avanzamento del processo conoscitivo, eseguire, preliminarmente alle altre attività, un accurato approfondimento documentale aggiuntivo. Oltre alla documentazione sulla tipologia strutturale del ponte o del viadotto, l’approfondimento documentale dovrà permettere di riconoscere con affidabilità la geometria ed il tipo di fondazioni che sostengono le spalle e le pile del ponte, che possono essere di tipo superficiale, di tipo profondo, su pali o su pozzi, o realizzate con fondazioni miste.

La documentazione dovrà riportare la presenza o meno di indagini geologiche, geofisiche e geotecniche sviluppate all’epoca della costruzione o durante la vita dell’opera, includendo la presenza di relazioni geologiche e/o geotecniche di progetto o predisposte durante la vita dell’opera ed eventuali monitoraggi o misure pregresse. Sia per le indagini che per gli studi disponibili dovrà essere valutato il grado di approfondimento e l’effettiva efficacia delle informazioni reperite, al fine di stabilire se risultino essere esaustive per il progetto della conoscenza dell’opera o meno. Dovrà altresì essere effettuata una analisi critica di tutte le informazioni disponibili ed acquisite durante la vita dell’opera.

5 ANALISI CRITICA DELLO STATO DELL’OPERA

Sulla base del contesto geologico e geotecnico di riferimento e della documentazione acquisita, sarà effettuata una analisi critica di eventuali lesioni e/o deformazioni documentate che interessano l’opera, cercando di definire i cinematismi che danno luogo alle deformazioni in atto ed il tipo di interferenza che riguarda il manufatto in relazione ai diversi tipi di fenomeni gravitativi e di instabilità illustrati al capitolo 2.

La presenza di tali elementi è sostanziale per la programmazione delle indagini volte alla definizione del quadro della conoscenza per le verifiche accurate di Livello 4.

6 ISPEZIONI SPECIALI E MODELLI PRELIMINARI

6.1 Ispezioni speciali

Le LLGG prevedono che, così come nel caso dei ponti in calcestruzzo armato precompresso a cavi post-tesi, anche per i ponti in aree *ad evidenza di fenomeni alluvionali, erosionali e franosi, o riconosciute ad elevato rischio idrogeologico, con evidenze di possibile interferenza con la struttura* si debbano eseguire ispezioni speciali atte a verificare la necessità di procedere con l'esecuzione diretta di valutazioni approfondite e le verifiche accurate della sicurezza di Livello 4.

Le ispezioni speciali si applicano, prioritariamente, al caso in cui sia evidente di uno stato di sofferenza della struttura che possa essere correlato alla presenza di un movimento franoso o che sia comunque possibile un'interazione, sia diretta che indiretta, tra fenomeno franoso, anche potenziale, e struttura, allo scopo di approfondire se tale interazione possa generare condizioni di sofferenza o il collasso della struttura stessa.

In presenza di fenomeni potenzialmente occorrenti, come ad esempio la caduta massi sull'impalcato o il danneggiamento di pile o spalle in conseguenza di fenomeni di flusso, le ispezioni speciali si effettueranno dove vi sia anche memoria storica di fenomeni ripetuti nel tempo occorsi nella zona di interferenza o in quelle immediatamente circostanti, oppure nei casi nei quali evidenze, emerse anche in sede di svolgimento di ispezioni ordinarie, lo indicassero come necessario.

Le ispezioni speciali saranno pertanto necessariamente eseguite nei seguenti casi:

1. Ponte/viadotto in area caratterizzata da elevato rischio idrogeologico così come definito nelle cartografie PAI/PSAI, IFFI o altre cartografie di pericolosità/rischio.
2. Ponte/viadotto interagente con frane per le quali sia ritenuto necessario ridurre il livello di incertezza nella valutazione dei parametri primari e secondari.
3. Ponte/viadotto in possibile interazione con fenomeni franosi rapidi, quali flussi di terra/roccia/detrito/ghiaccio o crolli/ribaltamenti accertati o presunti.
4. Ponte/viadotto con danni, fessurazioni, rotazioni, disallineamenti in elementi strutturali o nelle fondazioni per i quali non sia possibile escludere una correlazione tra queste e le condizioni di instabilità del sito.
5. Ponte/viadotto interagente con frane in cui sono presenti interventi di mitigazione.

L'ispezione speciale considererà indagini di tipo documentale e che possono prevedere l'esecuzione di studi fotogeologici e di analisi di dati satellitari, di rilievi e di prove ed indagini geofisiche e geotecniche. Tali indagini sono elencate di seguito in ordine di approfondimento e complessità esecutiva crescenti:

1. Informazioni geologiche e geomorfologiche disponibili.
2. Informazioni sulle condizioni meteorologiche nell'area circostante l'opera
3. Informazioni sull'eventuale pericolo di incendi.
4. Analisi delle informazioni ottenibili sulla base dell'elaborazione di immagini satellitari (Esempio: immagini SAR catturate dalla costellazione dei satelliti ESA Sentinel-1, disponibili in rete attraverso il progetto EGMS (European Ground Motion Service), i cui risultati sono pubblicati sul portale europeo Copernicus (<https://land.copernicus.eu>).
5. Studio foto geologico preliminare da Google Earth eventualmente esaltando la scala delle altezze.
6. Informazioni sulla geometria e caratteristiche delle strutture di fondazione di pile e spalle.
7. Informazioni sugli interventi di mitigazione realizzati.
8. Informazioni su eventuali sistemi di monitoraggio già predisposti in sito.
9. Studio fotogeologico attraverso l'analisi e il confronto di foto storiche, da terra, da aeromobile o da satellite.
10. Esecuzione di rilievi geologici e geomorfologici di dettaglio, con una ricostruzione preliminare dei caratteri geologici del sito estendendo, se necessario, le indagini a più ampia scala.
11. Esecuzione di rilievi Lidar ad alta risoluzione.
12. Esecuzione di rilievi con Laser Scanner da terra (TLS).
13. Prove geofisiche speditive (HVSr) o più di dettaglio (ERT, SASW, MASW, ecc.).
14. Prove geotecniche in sito speditive (CPT, CPTU, SCPT, SCPTU, DMT, SDMT, DPSH ecc.) e caratterizzate da costi contenuti.

La scelta di eseguire e, conseguentemente, il numero e la tipologia delle indagini, definite nei punti da 10 a 14, saranno valutati in modo accurato, per ogni singolo caso, da personale esperto.

Tali indagini concorreranno ad approfondire le conoscenze sui fenomeni in atto e potenziali contribuendo alla successiva eventuale modellazione geologica e geotecnica di dettaglio, necessaria per la valutazione della sicurezza di Livello 4. Le indagini permetteranno, inoltre, di individuare quali opere non necessitino di verifica accurata relativamente al rischio frana; per tali opere, i risultati delle indagini permetteranno un aggiornamento della Classe di Attenzione specifica, alla luce di una maggior conoscenza dell'opera e del dissesto.

In relazione alle tipologie di fenomeno franoso definite al capitolo 2, si riportano di seguito indicazioni utili per programmare le attività di approfondimento e le indagini che devono essere svolte in fase di ispezione speciale.

1. *Frane roto-traslazionali lente, che possono coinvolgere le pile, le spalle o l'intero ponte, sia trasversalmente che longitudinalmente e frane di dimensioni limitate che interessano localmente le pile o le spalle*: acquisizione documentale, inclusa l'analisi di dati di monitoraggio esistenti, studi fotogeologici e di dati satellitari, rilievi geologici e geomorfologici di dettaglio, rilievi Lidar, eventualmente integrati preliminarmente con indagini geofisiche, e, se ritenuto necessario, anche con indagini geotecniche in sito. Si porrà particolare attenzione, durante l'ispezione speciale, a finalizzare l'indagine anche all'identificazione delle caratteristiche delle fondazioni delle pile e delle spalle, nel caso non fossero accertate con sufficiente affidabilità.
2. *Flussi rapidi che possono impattare le pile, le spalle o l'intero ponte a seconda delle dimensioni del ponte, del volume movimentato e della velocità del fenomeno*: acquisizione documentale, inclusa l'analisi di dati di monitoraggio esistenti, studi fotogeologici a scala di bacino, rilievi geologici e geomorfologici a scala di bacino, rilievi Lidar a scala di bacino, eventualmente integrati, con Laser Scanner terrestre nelle aree di innesco del fenomeno. Si porrà particolare attenzione, durante l'ispezione speciale, a finalizzare l'indagine anche all'identificazione delle caratteristiche delle fondazioni delle pile e delle spalle, nel caso non fossero accertate con sufficiente affidabilità. Se necessario, si valuterà l'opportunità di eseguire indagini geofisiche e geotecniche.
3. *Caduta di massi con possibile impatto con parte dell'infrastruttura*: acquisizione documentale, inclusa l'analisi di dati di monitoraggio esistenti, studi fotogeologici della parete rocciosa, rilievi geologici, geomorfologici e geomeccanici dell'ammasso, rilievi Lidar e con Laser Scanner terrestre nelle aree di possibile distacco.

In nessun caso l'esito dell'ispezione speciale sarà basato solo su analisi documentale esistente. Indipendentemente dal fatto che l'ispezione speciale indichi la necessità – o meno - di esecuzione del Livello 4, le informazioni raccolte in questa fase permetteranno di aggiornare i parametri che concorrono alla determinazione della Classe di Attenzione frane e, di conseguenza, della Classe di Attenzione complessiva.

6.2 Modello geologico preliminare

Sulla scorta di quanto definito nelle fasi di Livello 0, 1, nonché degli approfondimenti sviluppati nell'ambito delle ispezioni speciali, sarà sviluppata una modellazione geologica preliminare finalizzata a

descrivere, negli elementi principali, il contesto geologico e geomorfologico nel quale è inserito il ponte o il viadotto, inquadrando le tipologie di fenomeni di instabilità in atto, evolutive o potenziali nell'ambito di quelle definite al capitolo 2. Il modello geologico preliminare fornirà anche indicazioni sull'interpretazione geomorfologica delle anomalie del reticolo idrografico o di forme particolari presenti sui versanti, che potrebbero fornire informazioni utili per definire instabilità più ampie o fenomeni gravitativi profondi dei versanti nonché sul reticolo idrografico minore incidente o in qualche modo interferente, per individuare fenomeni di erosione diffusa ed accelerata, fenomeni di flusso rapido o caduta massi. In definitiva, il modello geologico preliminare dovrà contenere tutti gli elementi principali per poter giungere, in una fase successiva, sulla base di un programma dettagliato di indagini geologiche e geotecniche, ad un modello geologico di sottosuolo congruente con quanto previsto dalle NTC 2018 e dalla Circolare Esplicativa.

6.3 Modello geotecnico preliminare

Riferendosi ai differenti tipi di movimento di versante definiti al punto 2, tenendo conto del modello geologico del versante e se in presenza di documentazione geotecnica già esistente e individuata nelle fasi di Livello 0, 1, il modello geotecnico preliminare dovrà comunque definire, in linea generale, le caratteristiche geotecniche attese dei terreni del sito e i caratteri geometrici/cinematici del fenomeno franoso interagente o potenzialmente interagente con il ponte unitamente all'acquisizione dei dati necessari alle analisi di stabilità, quali le caratteristiche meccaniche e idrauliche dei terreni o delle rocce presenti nonché la valutazione del comportamento delle discontinuità e del regime delle pressioni interstiziali. In caso di fenomeni di flusso rapido e di caduta massi, il modello geotecnico preliminare sarà esteso ad una scala sufficientemente ampia in relazione alla tipologia di fenomeno franoso in atto o potenziale. In definitiva, il modello geotecnico preliminare, dovrà contenere gli elementi principali, nonché un dettagliato piano di indagini geotecniche, per poter giungere, in una fase successiva, ad un modello geotecnico di dettaglio di sottosuolo congruente con quanto previsto dalle NTC 2018 e dalla Circolare Esplicativa.

7. PROGETTO DELLA CONOSCENZA PER LA VERIFICA ACCURATA DELLA SICUREZZA

7.1. Sicurezza dei ponti e viadotti interagenti con frane

Con riferimento alle problematiche che possono essere indotte sui ponti esistenti da instabilità di versante la conoscenza del manufatto e del contesto geologico-geotecnico è un passaggio cruciale per comprendere il reale comportamento del ponte in relazione all'interazione con il territorio in cui si inserisce. Occorrerà per i problemi di stabilità fare riferimento a quanto previsto dal punto 6.3 delle NTC

2018 e dalla Circolare Esplicativa. Di riferimento è anche Capitolo 8 delle NTC 2018 e della relativa Circolare Esplicativa, sia per quanto riguarda i riferimenti espliciti ai ponti esistenti (8.8 della Circolare Esplicativa), sia per tutti gli aspetti relativi alle costruzioni in generale e quindi ai ponti.

In accordo con le NTC 2018 (8.3) la valutazione della sicurezza deve permettere di stabilire se:

1. l'uso della costruzione possa continuare senza interventi;
2. l'uso debba essere modificato (declassamento, cambio di destinazione e/o imposizione di limitazioni e/o cautele nell'uso);
3. sia necessario aumentare la sicurezza strutturale, mediante interventi.
4. Se siano necessari interventi sul territorio nelle aree circostanti l'opera per evitare che possa essere compromessa la sicurezza dell'opera stessa.

Per quanto riguarda i ponti esistenti, la valutazione della sicurezza in relazione ai problemi di fondazione o di fenomeni di instabilità deve effettuarsi quando ricorra anche una sola delle situazioni elencate al punto 8.3 delle NTC 2018:

1. siano presenti importanti dissesti attribuibili a cedimenti delle fondazioni o dissesti della stessa natura si siano prodotti nel passato;
2. 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;
3. siano possibili fenomeni di liquefazione del terreno di fondazione dovuti alle azioni sismiche di progetto.

Allo scopo di verificare la sussistenza delle predette condizioni, si farà riferimento alla documentazione disponibile e si potrà omettere di svolgere indagini specifiche solo qualora, a giudizio esplicitamente motivato del tecnico esperto incaricato, sul volume di terreno significativo e sulle fondazioni sussistano elementi di conoscenza sufficienti per effettuare le valutazioni precedenti. La Circolare Esplicativa delle NTC 2018, utilmente, evidenzia che nella valutazione della sicurezza delle costruzioni esistenti *va vagliata l'opportunità di procedere ad una verifica della stabilità geomorfologica del sito e del sistema terreno-fondazione, ferma restando l'obbligatorietà di quest'ultima verifica al ricorrere anche di una sola delle condizioni elencate al punto 8.3 delle NTC 2018*. Nella relazione indicata dalla norma, il tecnico dovrà esplicitare che non sussistono le condizioni indicate al punto 8.3 delle NTC tenendo ovviamente conto anche della gravità del dissesto, in atto o prodottosi in passato.

Nel caso specifico, di ponti e viadotti con problemi dovuti all'interazione con fenomeni di instabilità di versante, cioè ponti che hanno accertata o potenziale interazione con movimenti gravitativi deve essere garantito di un adeguato livello di approfondimento dell'opera e del contesto geomorfologico in cui essa è inserita. Oltre all'analisi della documentazione disponibile, il progetto della conoscenza includerà le indagini geologiche/geofisiche/geotecniche, in misura proporzionale alla rilevanza del fenomeno e all'estensione della struttura, al fine di definire i modelli geologico e geotecnico di dettaglio.

La predisposizione dei modelli geologico e geotecnico preliminari rappresenteranno il riferimento per progettare le indagini necessarie a definire i modelli di dettaglio, contenenti le informazioni necessarie per la valutazione accurata della sicurezza nei confronti della stabilità dei versanti interagenti con i ponti, in modo conforme a quanto richiesto dal punto 6.3 delle NTC 2018.

Qualora la tipologia di fondazione risulti non nota o incerta, è opportuno prevedere l'esecuzione di indagini finalizzate a determinarne la geometria e la condizione.

7.2 Indagini

Gli studi e le indagini per le valutazioni di livello 4 devono essere sviluppati pianificati in modo unitario e coordinato per gli aspetti geologici, geotecnici, idraulici e strutturali, a partire dall'insieme delle conoscenze disponibili, e devono essere rivolti alla definizione dei modelli geologico e dei modelli geotecnici di sottosuolo sulla base dei quali effettuare lo studio delle condizioni di stabilità del versante e del ponte con esso interagente, nonché il progetto di eventuali interventi di stabilizzazione.

La scelta delle tipologie di indagine e misure, dell'ubicazione del numero di verticali da esplorare, della posizione e del numero dei campioni di terreno da prelevare e sottoporre a prove di laboratorio sarà oggetto di uno specifico progetto di indagine da redigere a cura dei professionisti incaricati.

Le indagini devono essere tali da permettere una descrizione accurata della successione stratigrafica dei terreni interessati da cinematismi di collasso effettivi e potenziali e, in caso di pendii in frana, deve consentire di accertare forma e posizione della superficie o delle superfici di scorrimento esistenti e definire i caratteri cinematici della frana, l'entità e la distribuzione delle pressioni interstiziali nel terreno e nelle discontinuità, oltre che degli eventuali spostamenti piano-altimetrici di punti in superficie e in profondità. La profondità delle indagini deve essere fissata in relazione alle caratteristiche geometriche del pendio, ai risultati dei rilievi di superficie nonché alla più probabile posizione della eventuale superficie di scorrimento.

Le indagini geologiche e geotecniche finalizzate alle analisi in condizioni sismiche devono comprendere l'accertamento degli elementi che, unitamente agli effetti topografici, influenzano la propagazione delle onde sismiche, quali le condizioni stratigrafiche e la presenza di un substrato rigido o di una formazione

ad esso assimilabile. In ogni caso, la caratterizzazione geotecnica dei terreni deve consentire almeno la classificazione sismica del sottosuolo secondo i criteri esposti nelle NTC 2018.

7.3 Modello geologico di dettaglio

Lo studio geologico di dettaglio dei versanti naturali, finalizzato alla valutazione delle condizioni di stabilità in relazione ai meccanismi di interazione con l'opera deve prendere le mosse dalla definizione dell'assetto geologico-strutturale, geomorfologico, litologico e idrogeologico del versante al fine di identificare i meccanismi e i cinematismi di rottura attuali o potenziali, nonché le possibili cause. Lo studio deve essere esteso al così detto ambito geomorfologico significativo¹.

L'obiettivo dello studio geologico dei versanti interagenti con i ponti è pertanto, quello di costruire un modello geologico di dettaglio finalizzato, oltre che alla illustrazione dei predetti assetti, anche alla conoscenza dello stato e tipo di attività delle eventuali interazioni con il ponte.

Nel caso di presenza di eventi pregressi di frana nell'area di specifico interesse, i dati ottenuti dalle attività di indagine, sia di superficie sia in profondità, dovranno condurre ad una dettagliata ricostruzione dei fenomeni che interessano i versanti interagenti con il ponte nelle tre dimensioni, attraverso specifiche planimetrie e sezioni geologiche illustrative di dettaglio, in numero ed in scala adeguata a definire le potenziali problematiche che consentano di inquadrare e valutare le potenziali interazioni con il ponte. Soprattutto in presenza di eventi attivi, può essere necessario integrare i dati dei rilievi con misure di spostamento superficiale o profondo del pendio e con i dati di monitoraggio più in generale, al fine di validare il modello geologico.

Nel caso di fenomeni di flussi a scala di bacino, lo studio deve essere esteso ad una zona sufficientemente ampia da comprendere la natura e la complessità del fenomeno di propagazione mentre per i fenomeni di caduta massi sarà fondamentale definire il campo di fratturazione dell'ammasso roccioso e le relative caratteristiche geomeccaniche.

7.4 Modello geotecnico di dettaglio

La caratterizzazione geotecnica del pendio richiede la determinazione sperimentale delle proprietà meccaniche e idrauliche dei terreni attraverso prove in situ e in laboratorio. In presenza di terreni a grana fine, le prove di laboratorio sono necessarie per la determinazione dei parametri di resistenza.

¹ Per ambito geomorfologico significativo si intende quella porzione di territorio, identificabile e delimitabile anche in profondità, nella quale sussistano assetti predisponenti ad una specifica tipologia di movimento franoso o più in generale di movimenti gravitativi di versante, ed in cui i processi morfo-evolutivi di versante/fondovalle possano interferire direttamente o indirettamente con l'area d'interesse.

Il regime delle pressioni interstiziali nel sottosuolo deve essere ricostruito con adeguata approssimazione mediante misure puntuali effettuate con piezometri, da posizionare tenendo conto che una distribuzione disomogenea della permeabilità può influenzare apprezzabilmente la rete idrodinamica con notevoli riflessi sulla distribuzione delle pressioni interstiziali e quindi sulle condizioni di stabilità del pendio.

Nei pendii in roccia ed i fenomeni di caduta massi si devono effettuare rilievi della struttura dell'ammasso roccioso con individuazione delle principali discontinuità, definite da posizione, giacitura e persistenza. Si deve procedere, poi, alla caratterizzazione meccanica della resistenza a taglio delle discontinuità, che è influenzata dalla rugosità della superficie, dalla resistenza a compressione della roccia in prossimità della superficie stessa e dalla presenza di materiale di riempimento ed infine eseguire simulazioni delle traiettorie potenzialmente impattanti.

Per i movimenti gravitativi profondi è necessario eseguire indagini specifiche sulla caratterizzazione del fenomeno e sulla resistenza delle formazioni coinvolte ad alti livelli di tensione.

Nel caso di flussi di versante, le indagini devono essere estese ad un bacino di alimentazione sufficientemente ampio da poter definire le caratteristiche meccaniche delle formazioni interessate, per un loro utilizzo ai fini della simulazione della propagazione fino all'impatto con il ponte.

Se le condizioni del terreno rientrano tra quelle definite al punto 7.11.3.4 delle NTC 2018, si deve eseguire una caratterizzazione del sottosuolo per la verifica di suscettibilità alla liquefazione.

8. PROGRAMMAZIONE DELLE INDAGINI GEOLOGICHE, GEOFISICHE E GEOTECNICHE

I piani di indagine inerenti ai movimenti franosi interagenti con ponti e viadotti devono necessariamente essere predisposti ricorrendo ad un approccio di tipo esperto, al fine di poter programmare indagini pianificate in modo unitario e coordinato a partire dall'insieme delle conoscenze disponibili, devono consentire di definire il modello geologico di dettaglio dell'area sulla quale insiste l'opera, nonché il modello geotecnico di dettaglio in relazione ai meccanismi di interazione della parte strutturale con quella di stabilità del tipo di versante interagente, anche in relazione alla azione sismica.

8.1 Indagini e rilievi preliminari

Per quanto concerne l'aspetto metodologico, si ritiene che le verifiche accurate della sicurezza di Livello 4 debbano considerare come punto di partenza i risultati ottenuti dalle operazioni, elencate nella sezione 6 eseguite in fase di ispezione speciale per le varie tipologie di fenomeno franoso. Nel caso di opere sottoposte direttamente al Livello 4, senza che sia stata eseguita un'ispezione speciale, è opportuno strutturare il progetto della conoscenza prevedendo comunque l'esecuzione delle medesime operazioni

preliminarmente alle successive indagini di approfondimento. Come sottolineato nel capitolo 4, un preventivo approfondimento documentale deve guidare la stesura del progetto della conoscenza dell'opera.

8.2 Indagini minime per le fondazioni su pali di cui alle NTC 2018

Le NTC 2018, nell'ambito della progettazione delle fondazioni su pali, al paragrafo 6.4.3.1.1 richiedono di disporre di almeno una verticale indagata per ciascun sistema di fondazione. Tale direttiva, con riferimento a ponti e viadotti, secondo quanto riportato nella Circolare Esplicativa delle NTC 2018 al paragrafo 6.4.3.1, si declina in una verticale di indagine per ogni opera d'arte (pila, spalla), alle quali vanno aggiunte le prescrizioni generali relative agli aspetti geologici e geotecnici di cui al 6.2 delle NTC 2018. Tuttavia, nei casi in cui il modello geologico e geotecnico mostri uniformità del profilo stratigrafico e delle proprietà meccaniche in corrispondenza alle pile e spalle del ponte o viadotto, a giudizio esplicitamente motivato del tecnico esperto incaricato, potranno essere valutate ottimizzazioni delle verticali indagate, garantendo in ogni caso una conoscenza adeguata alla definizione formulazione di modelli geologici e geotecnici di dettaglio, sulla base dei quali eseguire le verifiche accurate di Livello 4.

Nel caso non si disponesse di informazioni sulle fondazioni del ponte o viadotto, si dovrà valutare l'impiego di indagini specifiche, quali, ad esempio, scavi per l'osservazione diretta delle fondazioni superficiali e delle caratteristiche alla testa di eventuali pozzi o pali. La lunghezza di questi ultimi, incluso la distribuzione delle armature, potrà essere investigata ricorrendo ad un piano di indagini specifico che può prevedere indagini non distruttive e/o carotaggi in asse ai pali.

8.3 Indagini sul pendio

Per quanto riguarda il versante le indagini devono essere tali da consentire un'adeguata modellazione dell'assetto stratigrafico dei terreni coinvolti da cinematismi in atto o potenziali, e devono consentire l'identificazione della forma e posizione della/e eventuale/i superficie/i di scorrimento e del cinematismo. Nel caso di pendii costituiti da terreni, le verticali di indagine devono essere preferibilmente allineate lungo una o più sezioni longitudinali del pendio ed essere opportunamente spaziate per ottenere informazioni sufficienti lungo tutta l'estensione del pendio e nell'ambito delle profondità significative per il fenomeno in atto o potenziale.

La profondità di indagine dovrà essere tale da consentire l'identificazione dei limiti superiore e inferiore di possibili zone critiche. In assenza di chiare evidenze di superfici di localizzazione delle zone di scorrimento, spesso suggerite dalle condizioni lito-stratigrafiche del sito, la profondità minima potrà

essere valutata attraverso le sezioni dei modelli geologico e geotecnico preliminari basate sui possibili meccanismi di riferimento. In caso di superfici di scivolamento preesistenti, la profondità di indagine dovrà essere estesa adeguatamente oltre la zona di potenziale rottura.

Il regime delle pressioni interstiziali nel sottosuolo dovrà essere ricostruito con adeguata accuratezza, dove possibile, mediante misure puntuali effettuate con piezometri, da ubicare tenendo conto che una distribuzione disomogenea della permeabilità può influenzare apprezzabilmente la rete idrodinamica con notevoli riflessi sulla distribuzione delle pressioni interstiziali e quindi sulle condizioni di stabilità del pendio. Per rilevare le variazioni del regime delle pressioni interstiziali nel tempo è necessario effettuare un monitoraggio per un periodo di tempo di congrua durata in relazione alle caratteristiche idrogeologiche dell'area e alle criticità presenti. Altre tipologie di movimenti di versante, tra cui i flussi indotti da eventi di pioggia molto intensi o persistenti, dovranno essere studiati facendo riferimento a modelli interpretativi più specifici.

Nel caso di pendii in roccia si eseguiranno opportuni rilievi della struttura dell'ammasso roccioso, al fine di individuare le principali discontinuità e caratteristiche quali posizione, giacitura, persistenza e di valutare la relativa resistenza a taglio necessaria per le analisi di stabilità.

Il programma delle indagini geologiche, geofisiche e geotecniche deve essere adeguatamente motivato in relazione alle esigenze di definizione dei modelli geologici e geotecnici di dettaglio, come richiesto nelle NTC 2018 e nella Circolare Esplicativa, sia in condizioni statiche che sismiche, per le verifiche agli stati limite ultimi e agli stati limite di esercizio, evidenziando i parametri in relazione ai modelli costitutivi e numerici che si intendono adottare.

8.4 Indagini sismiche

Al fine di valutare il comportamento del movimento franoso interagente con l'infrastruttura quando sottoposto ad azioni sismiche, oltre alla valutazione della sismicità caratteristica dell'area si valuterà l'opportunità di una caratterizzazione dinamica dei terreni interessati. Se dall'analisi della documentazione storica la caratterizzazione sismica non è presente/disponibile, sarà necessario programmare, da parte di un tecnico esperto, indagini specifiche. Le indagini potranno essere geofisiche di superficie (MASW, SASW, HVSR ecc.), indagini geotecniche sismiche in sito (SCPT, SDMT) o in fori di sondaggio (CH, DH), unitamente a prove geotecniche in laboratorio (Colonna Risonante / Taglio torsionale ciclico), che permettano di ottenere informazioni dettagliate sulla velocità di propagazione delle onde sismiche nel terreno, sulle condizioni geometriche del modello di riferimento (1D, 2D o 3D), sulle frequenze caratteristiche di risonanza di sito, sulla posizione del substrato roccioso sismico e su eventuali fenomeni di liquefazione.

9. MONITORAGGIO

Contestualmente al programma di indagini, sia in fase di ispezione speciale che di eventuale approfondimento di Livello 4, potrà risultare opportuno definire un adeguato piano di monitoraggio, che potrà sfruttare i sondaggi eseguiti per le indagini ai fini dell'installazione di strumentazioni ed essere perfezionato tenendo conto delle risultanze delle indagini eseguite. Tale piano di monitoraggio può prevedere l'utilizzo di metodi diretti e indiretti, quali, a titolo di esempio: inclinometri, piezometri, analisi interferometriche satellitari specifiche per l'area di interesse, laser scanner ripetuti, indagini geofisiche ripetute ecc. da contestualizzare in relazione alla complessità del caso analizzato e al tipo di approfondimento.

Il piano sarà finalizzato a monitorare l'evoluzione del fenomeno franoso interagente con le diverse parti dell'infrastruttura, al fine di avere il controllo delle principali caratteristiche cinematiche del movimento franoso e la velocità di movimento/propagazione:-

Più nello specifico, per fenomeni franosi con interferenza diretta, così come definita dalle LLGG, gli strumenti di monitoraggio riguarderanno soprattutto la misura degli spostamenti superficiali (con monitoraggio di superficie tramite capisaldi topografici o avanzato tramite sistemi di rilievo Lidar o Laser Scanner), degli spostamenti profondi (tradizionalmente misurati tramite inclinometri) e delle pressioni interstiziali (misurate tramite piezometri). Le tipologie, le posizioni, il numero e i volumi di indagine dei vari approcci di monitoraggio saranno definite da tecnici esperti attraverso giudizio esplicitamente motivato, in funzione delle caratteristiche meccaniche e cinematiche del fenomeno franoso interagente con il ponte, tenendo anche conto dell'accessibilità e della visibilità dei luoghi.

Per fenomeni franosi con interferenza indiretta, di crollo o flusso, con velocità da rapida a molto rapida, gli strumenti di monitoraggio riguarderanno, in particolare, il controllo delle condizioni meteorologiche e, soprattutto, la definizione delle aree e dei volumi mobilitabili e delle possibili traiettorie/percorsi di propagazione, considerando anche la possibilità di utilizzo di sistemi di allertamento e interdizione della circolazione in caso di occorrenza di eventi estremi.

10. BIBLIOGRAFIA

- Ansfisa (2022). Istruzioni Operative per l'applicazione delle Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti.
- Circolare No. 7, (2019), Circolare del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 21 Gennaio 2019, N. 7. C.S.LL.PP., Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le

Costruzioni”» di cui al Decreto Ministeriale 17 Gennaio 2018; Supplemento Ordinario alla “Gazzetta Ufficiale” N. 35 Del 11 Febbraio 2019 - Serie Generale; Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: Roma, 2019.

- Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996). Landslide Types and Processes, Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report, 247: 36-75, January 1996, Special Report - National Research Council, Transportation Research Board 247:36-57.
- Decreto Ministeriale 14 Gennaio 2018 (NTC 2018). Aggiornamento delle «Norme tecniche Per Le Costruzioni». Supplemento Ordinario alla “Gazzetta Ufficiale”; N. 42 Del 20 Febbraio 2018—Serie Generale; Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: Roma, 2018.
- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, The Varnes classification of landslide types, an update, Landslides (2014) 11:167–194, DOI 10.1007/s10346-013-0436-y
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2020). Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti. MIT Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti CSLLPP Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.