



INFRASTRUCTURE ACADEMY

Il progetto della conoscenza nella valutazione
e nel monitoraggio dei ponti esistenti

Prof. Walter Salvatore

UNIPI e Presidente Consorzio FABRE

Con il patrocinio di





**INFRASTRUCTURE
ACADEMY**
Think smart, build safe



Il progetto della conoscenza nella valutazione e il monitoraggio dei ponti esistenti

Prof. Ing. Walter Salvatore

*Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria Civile ed Industriale
Presidente del Consorzio FABRE*



L'albero della conoscenza delle strutture



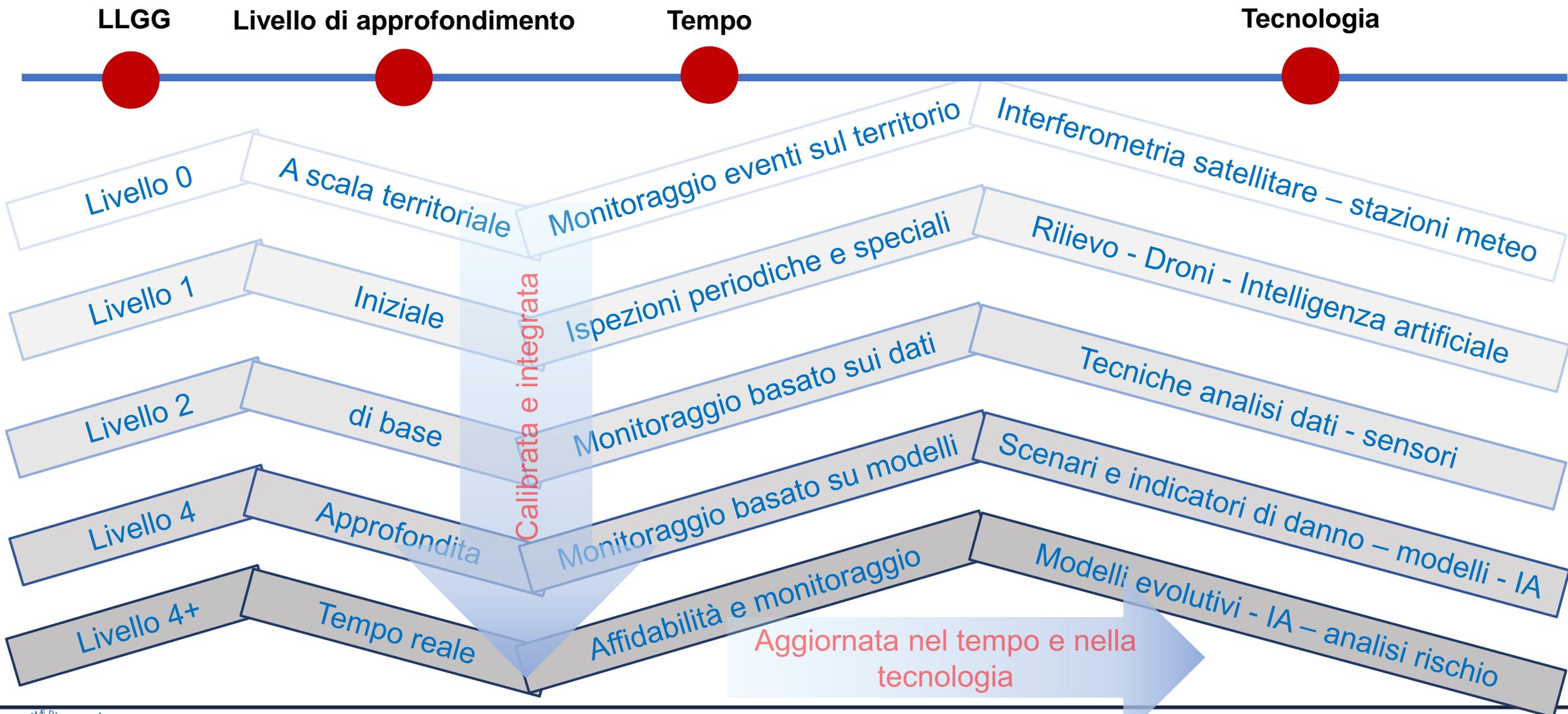
Alla base di qualsiasi attività di gestione deve esserci un'adeguata conoscenza della struttura e del contesto analizzati.

Ogni attività di gestione, a partire dalle semplici operazioni di censimento fino al monitoraggio strumentale, aggiunge conoscenza.

La raccolta, l'analisi e la gestione dell'elevata quantità di informazioni raccolte, devono essere **ben progettate, razionali e sistematizzate.**

In base agli obiettivi da perseguire, la **conoscenza** deve essere **calibrata** su più livelli di approfondimento **integrati** tra loro, ciascuno **aggiornabile** nel tempo e nella tecnologia.

I rami della conoscenza dei ponti e viadotti esistenti



L'importanza della conoscenza nel processo di gestione dei ponti esistenti

CONOSCENZA

- ➔ **Calibrata** sulla base delle finalità perseguite, del livello di approfondimento richiesto e dalla tipologia di opera analizzata.
- ➔ **Integrata e aggiornabile** consentendo l'aggiornamento, il confronto e l'elaborazione dei dati sulla base di nuove ispezioni o indagini.
- ➔ **Strutturata** in modo che tutte le informazioni acquisite siano organizzate, gestite e conservate in modo razionale.

La conoscenza è **incrementabile** in funzione dei **livelli di approfondimento** e dello studio **dell'evoluzione** dello **stato di conservazione**. Una **organizzazione razionale** delle informazioni raccolte nei vari livelli e nel tempo ne permette il **confronto**.

L'importanza della conoscenza nel processo di gestione dei ponti esistenti

CONOSCENZA

Ai fini della progressiva piena conoscenza delle opere, occorre riconoscere, localizzare e quantificare:

- **Situazioni evolutive di danno e degrado** delle opere;
- **Rischi naturali interferenti** (frana, sisma, rischio idraulico);
- **Azioni di elevata intensità non previste** nel progetto (vento, temperatura, traffico eccezionale).

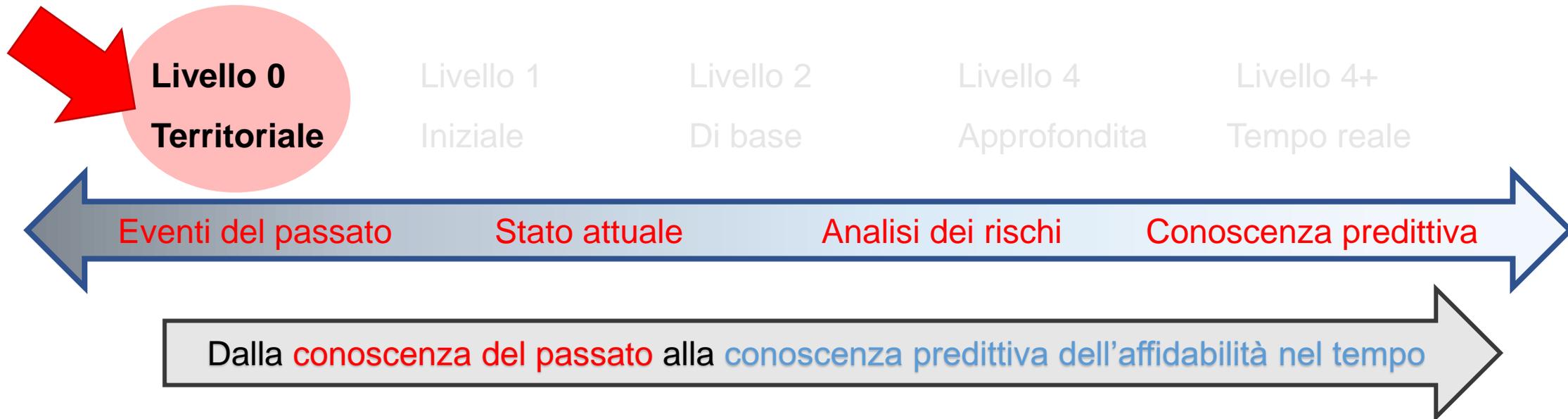


L'importanza della conoscenza nel processo di gestione dei ponti esistenti

CONOSCENZA

Ai fini della progressiva piena conoscenza delle opere, occorre riconoscere, localizzare e quantificare:

- **Situazioni evolutive di danno e degrado** delle opere;
- **Rischi naturali interferenti** (frana, sisma, rischio idraulico);
- **Azioni di elevata intensità non previste** nel progetto (vento, temperatura, traffico eccezionale).



Conoscenza a scala territoriale

UN APPROCCIO PROGRESSIVO ALLA CONOSCENZA TERRITORIALE:
dalla **conoscenza del passato** al monitoraggio dei **fenomeni evolutivi interferenti**

- **Conoscenza dal passato**

- ricerca documentale: progetto, prove sui materiali, prove di collaudo, interventi di manutenzione, etc.
- rilievi geometrici e/o strutturali e/o ispezioni eseguite nel passato
- analisi degli eventi naturali avvenuti nel passato (terremoti, frane, alluvioni)
- analisi degli eventi eccezionali non previsti nel progetto avvenuti nel passato

- **Stato attuale**

- analisi delle carte di pericolosità (sismica, frane, idraulica)

- **Monitoraggio a livello territoriale**

- analisi dei fenomeni franosi in essere a livello territoriale: interferometria satellitare
- analisi dei fenomeni atmosferici (precipitazioni, vento, variazioni termiche): stazioni meteo
- analisi dei fenomeni sismici: stazioni accelerometriche

Conoscenza a scala territoriale: dal censimento al monitoraggio

Visione integrata dell'opera nel suo contesto

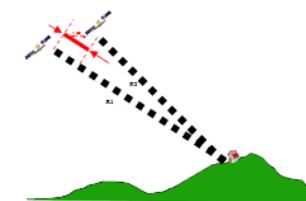
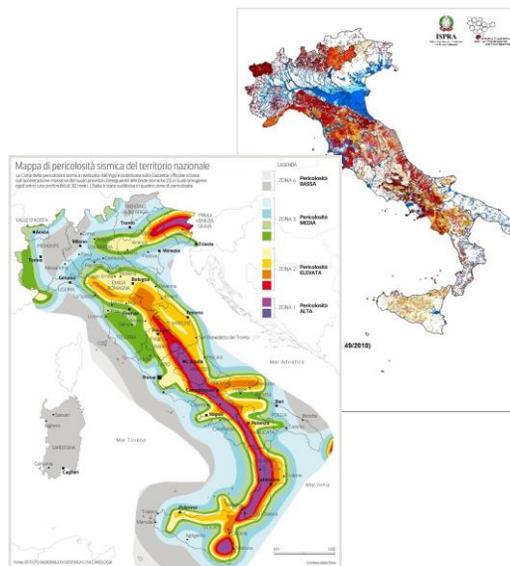
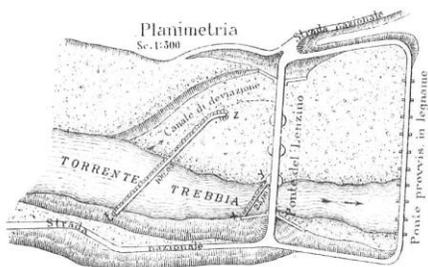
Valutazione dei **rischi interferenti**

Pianificazione delle attività successive (conoscenza di base)

Conoscenza dal passato

Stato attuale

Monitoraggio territoriale



CENSIMENTO: ANALISI TERRITORIALE DELLE OPERE NEL LORO CONTESTO

MONITORAGGIO A LIVELLO TERRITORIALE DEL CONTESTO

L'evoluzione temporale della conoscenza

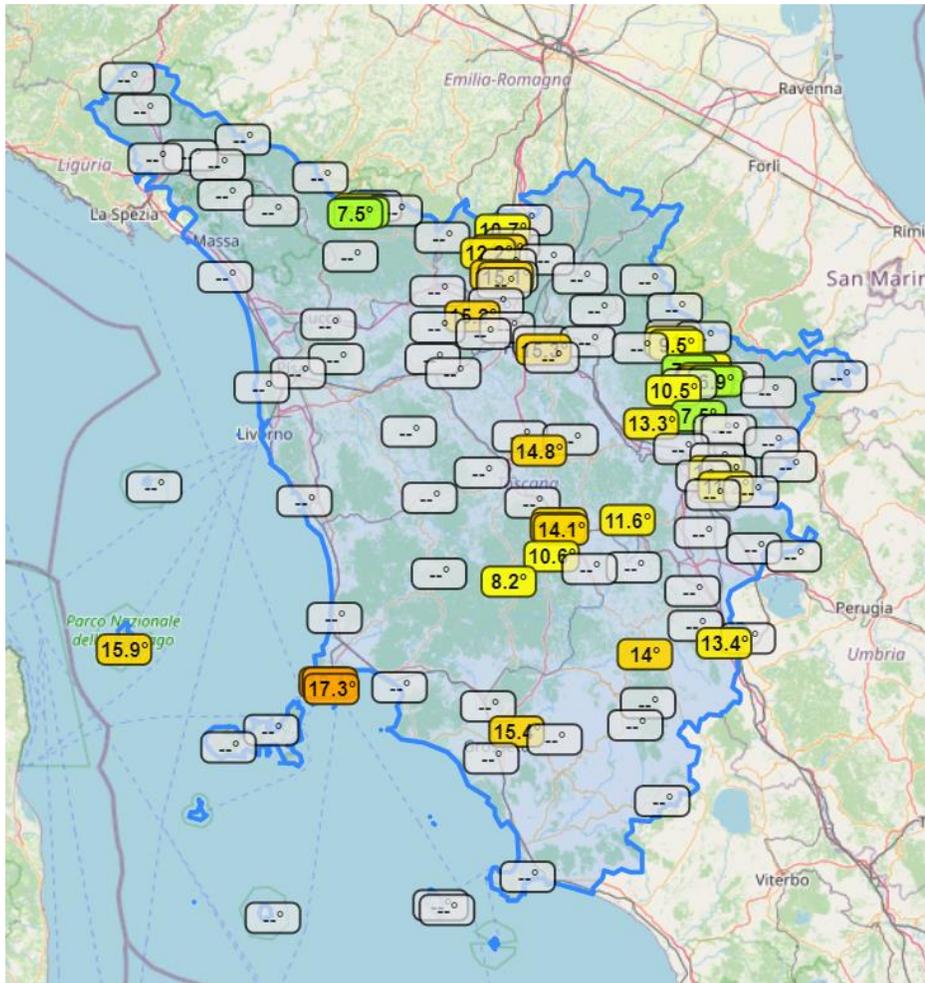
Tecnologia InSAR per lo studio dell'interferenza frana-struttura, quantificando lo **spostamento e la velocità di avanzamento** della frana.



- Sviluppo di un apposito modulo per la:
- Mappatura dei nodi target sul territorio
 - Mappatura dei nodi target sulle opere
 - Valutazione dei movimenti differenziali tra terreno e opera
 - Valutazione dell'evoluzione temporale del movimento differenziale
 - Valutazione del rischio potenziale in funzione del gradiente di spostamento e della tipologia di opere

L'evoluzione temporale della conoscenza

Rete stazioni meteo per l'analisi di fenomeni naturali e eventi eccezionali.



Sviluppo di un apposito modulo per la:

- Acquisizione dei dati meteo rilevanti per la rete infrastrutturale (vento, temperatura, eventi atmosferici)
- Estrapolazione dei dati acquisiti ai fini della valutazione territoriale degli effetti sulle opere
- Valutazione dei possibili rischi di tipo idraulico a seguito di fenomeni atmosferici intensi
- Valutazione dei possibili rischi da eventuali eventi atmosferici eccezionali sulle opere

L'evoluzione temporale della conoscenza

Rete accelerometrica nazionale per l'analisi di eventi sismici particolarmente intensi o di intensità eccezionali.

RETE ACCELEROMETRICA NAZIONALE - RAN DOWNLOAD



Sviluppo di un apposito modulo per la:

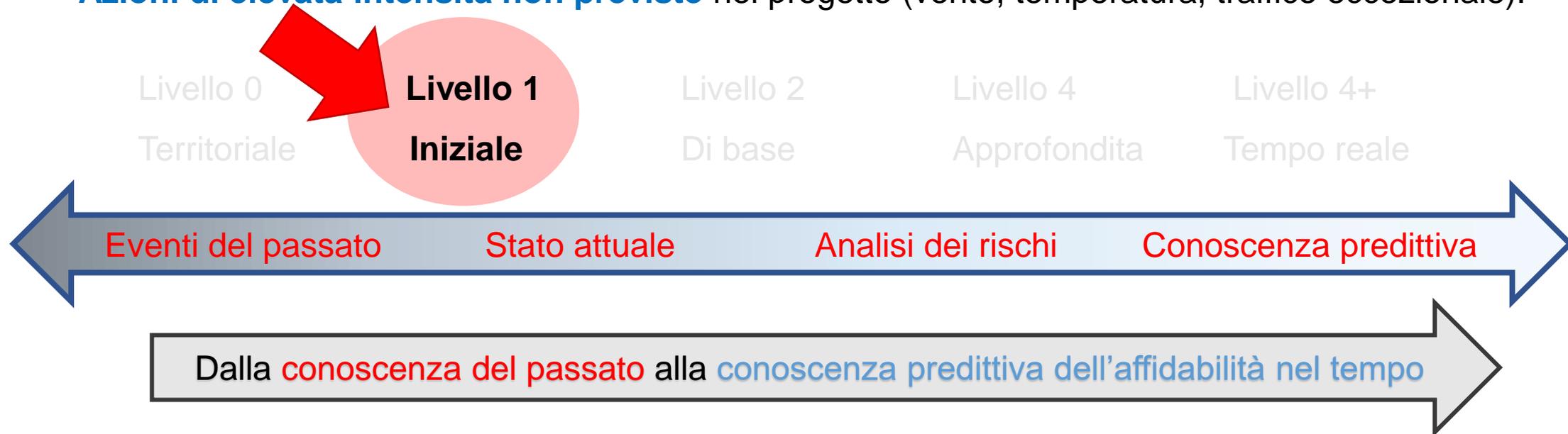
- Acquisizione dei dati sismici rilevanti per la rete infrastrutturale
- Estrapolazione dei dati acquisiti ai fini della valutazione territoriale degli effetti sulle opere
- Valutazione dei possibili rischi di tipo sismico a seguito di fenomeni sismici particolarmente intensi

L'importanza della conoscenza nel processo di gestione dei ponti esistenti

CONOSCENZA

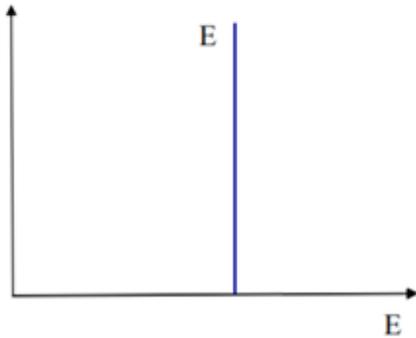
Ai fini della progressiva piena conoscenza delle opere, occorre riconoscere, localizzare e quantificare:

- **Situazioni evolutive di danno e degrado** delle opere;
- **Rischi naturali interferenti** (frana, sisma, rischio idraulico);
- **Azioni di elevata intensità non previste** nel progetto (vento, temperatura, traffico eccezionale).



Conoscenza iniziale: parametri LOCALI per la definizione della conoscenza

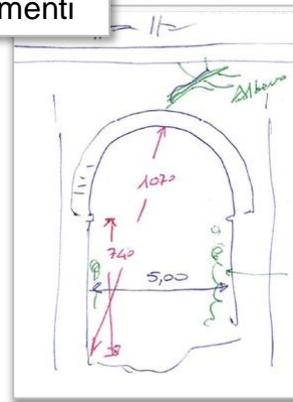
UNIVOCAMENTE DEFINITI



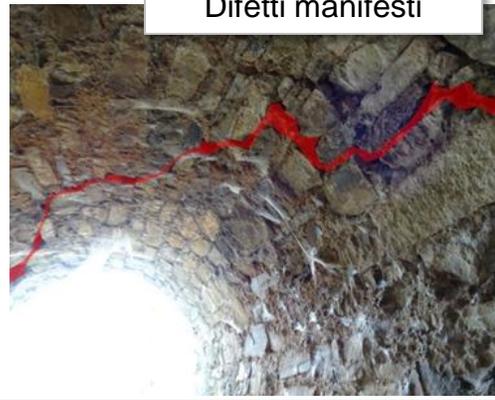
Non è associabile **nessun tipo di incertezza** se non quella di misura.

È possibile eseguire una misura completa del parametro incognito. L'incertezza del parametro dipende **dalla accuratezza dello strumento**.

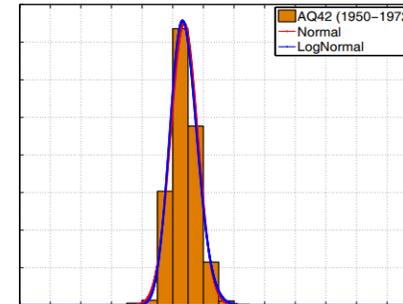
Geometria degli elementi



Difetti manifesti



DETERMINATI SU BASE STATISTICA



Incertezze **aleatorie** o **epistemiche** da valutarsi **statisticamente**.

Grandezza fisica variabile con continuità o non direttamente identificabile (difetto occulto):

non è possibile eseguire una misura completa del parametro incognito. L'incertezza del parametro dipende dalla accuratezza della prova e dal numero di prove.

Resistenza dei materiali



Difetti occulti

Conoscenza iniziale: parametri LOCALI per la definizione della conoscenza

Per la maggior parte di tipologie costruttive lo **stato di conservazione** e le **tipologie di danneggiamento** sono rilevabili tramite le **ispezioni visive**. Tuttavia alcune strutture o dettagli costruttivi sono afflitte anche da difetti occulti.

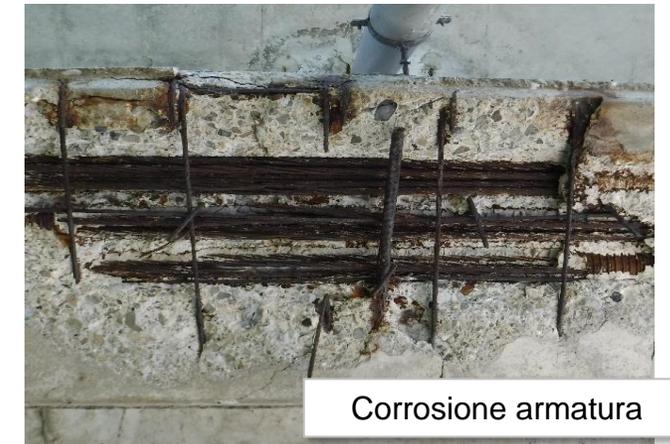
Ispezioni visive



Le ispezioni visive consentono di cogliere **soltanto difettosità manifesta**

Difetto manifesto

Difettosità **univocamente determinabile**.
Ogni difetto manifesto deve essere **individuato** e **quantificato** su ogni elemento costituente l'opera.



Conoscenza iniziale: parametri LOCALI per la definizione della conoscenza

Per la maggior parte di tipologie costruttive lo stato di conservazione e le tipologie di danneggiamento sono rilevabili tramite le ispezioni visive. Tuttavia alcune strutture o dettagli costruttivi sono afflitte anche da **difetti occulti**.



Le ispezioni visive **NON** consentono di cogliere **difettosità occulta**

Difetti occulti

Difettosità **non** apprezzabile ad occhio nudo.

Un difetto occulto potrebbe essere segnalato dalla presenza di **difetti spia**.



Ponti in c.a.p. a cavi post-tesi



Conoscenza iniziale: ispezioni iniziali e periodiche – parametri univocamente definiti

DALL'ISPEZIONE VISIVA ALLA VALUTAZIONE **AUTOMATICA** DEGLI SCENARI DI RISCHIO E DI DANNO:

- **Conoscenza dal passato**

- dal Livello 0: analisi delle passate ispezioni visive, delle valutazioni idrauliche e di stabilità dei terreni
- dal Livello 0: analisi degli eventuali fenomeni naturali monitorati a livello territoriale

- **Stato attuale**

- esecuzione delle ispezioni visive come da LLGG
- utilizzo di metodi di rilievo per la realizzazione del modello fotogrammetrico digitale
- utilizzo di metodi di rilievo per la realizzazione del modello geometrico digitale
- utilizzo di metodi di IA per il riconoscimento, la localizzazione e la quantificazione dei difetti
- utilizzo di metodi di IA per l'individuazione di eventuali meccanismi di danno o scenari di rischio

- **Monitoraggio a livello territoriale**

- utilizzo dei metodi di analisi dati e IA per la valutazione dell'evoluzione degli eventuali difetti, meccanismi di danno e scenari di rischio confrontando ispezioni successive

Conoscenza iniziale: dal rilievo all'analisi degli scenari di danno e di rischio

Ispezioni periodiche per tutte le opere

ESIGENZA

Monitorare puntualmente lo stato di conservazione delle opere e l'**evoluzione** dei fenomeni di danneggiamento.
Agevolazione delle procedure di ispezione e confronto dati.
Possibile **predizione dei meccanismi di collasso** in funzione dei fenomeni di danneggiamento rilevati.

OBIETTIVO

Sviluppo di **sistemi informatizzati** a supporto **dell'esecuzione delle attività di ispezione**, dell'**analisi** e **rielaborazione** dei dati raccolti.

Possibili tecniche e tecnologie a supporto delle ispezioni periodiche e rielaborazioni dati.

- ✓ TECNICHE DI RILIEVO → Droni e laser scanner.
- ✓ SVILUPPO DI MODELLI DIGITALI → Modello digitale GEOMETRICO e FOTOGRAMMETRICO
- ✓ TECNICHE DI ANALISI DATI e APPRENDIMENTO → rielaborazione dati automatizzata per rilevamento di possibili situazioni critiche e algoritmi di INTELLIGENZA ARTIFICIALE.

Conoscenza iniziale: dal rilievo all'analisi degli scenari di danno e di rischio

Ispezioni periodiche per tutte le opere

Possibili tecniche e tecnologie a supporto delle ispezioni periodiche e rielaborazioni dati

TECNICHE DI RILIEVO Droni e laser scanner

LASER
SCANNER

Rilievo esatto della **geometria** dell'opera e della **configurazione** dei suoi componenti.

SVILUPPO DI MODELLI DIGITALI Geometrico e fotogrammetrico

Costruzione di un **modello geometrico** dell'opera.

ANALISI DATI E APPRENDIMENTO Rielaborazione automatizzata e intelligenza artificiale

Algoritmi di **rielaborazione dati geometrici** acquisiti nel tempo per **monitoraggio fenomeni in corso**.

DRONI

Fotogrammetria struttura, elementi strutturali e difetti presenti.

Costruzione di un **modello fotogrammetrico** dell'opera, che **mappi la struttura, gli elementi ed i difetti associati**.

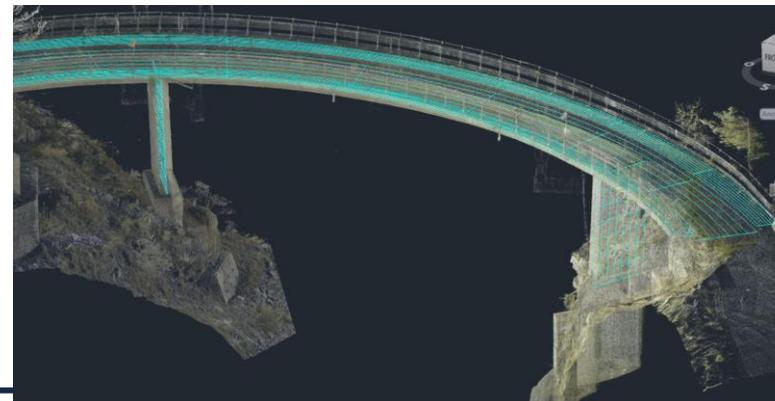
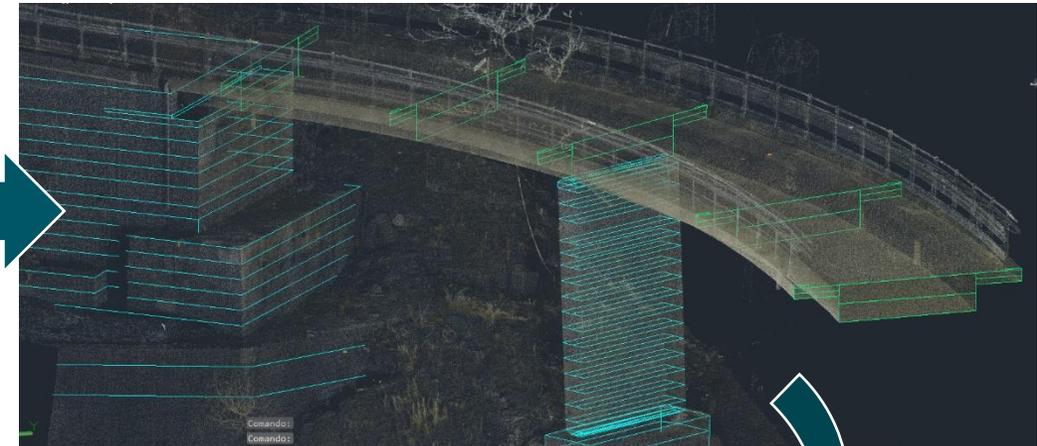
Algoritmi di **intelligenza artificiale** per individuazione e catalogazione difetti, fino alla **previsione di eventuali meccanismi**.



Conoscenza iniziale: dal rilievo all'analisi degli scenari di danno e di rischio

Ponte sul rio Bavera

Rilievo laser scanner georeferenziato per esatta posizione e geometria elementi strutturali.
Da ripetersi nel tempo per monitorare gli spostamenti degli elementi strutturali e il **cambiamento della configurazione**.



Rilievo utilizzabile per
livelli di
approfondimento
successivi. 

Conoscenza iniziale: dal rilievo all'analisi degli scenari di danno e di rischio

Ispezioni periodiche per tutte le opere – ricerche in corso

Gemello fotogrammetrico e algoritmi di intelligenza artificiale

**GEMELLO DIGITALE
FOTOGRAMMETRICO**

+



Droni, fotogrammetria ed intelligenza artificiale per il **riconoscimento, la mappatura, la quantificazione e la classificazione dei difetti**, nonché l'individuazione di eventuali **meccanismi evolutivi di collasso** attivati da tali difetti.

→ **Primo screening** di supporto alla valutazione della difettosità delle opere e alla determinazione di criteri per la prioritizzazione delle opere.

→ **Step successivo**: valutazione dei possibili meccanismi di collasso attivabili da tali difetti.

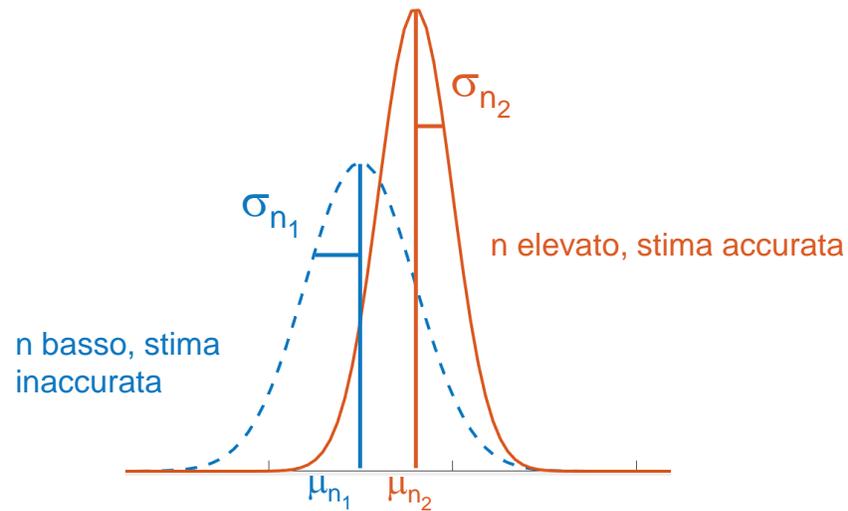


Conoscenza iniziale: ispezioni speciali – parametri statisticamente determinati

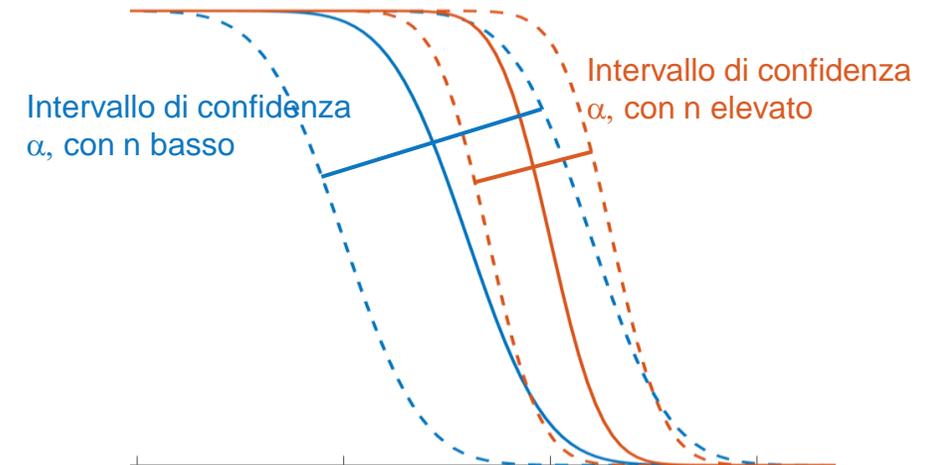
PARAMETRI DETERMINATI SU BASE STATISTICA

Incertezze **aleatorie** o **epistemiche** da valutarsi **statisticamente**. L'incertezza del parametro dipende dalla accuratezza della prova e dal **numero di prove**

Per raggiungere un **livello di confidenza obiettivo** per la stima dei parametri della distribuzione, è necessario valutare **l'ampiezza del campione** in base alla qualità della prova e alla conoscenza pregressa sul fenomeno.



Errore nella stima dei parametri



Elevata incertezza sui parametri

Conoscenza iniziale: ispezioni speciali – parametri statisticamente determinati

PARAMETRI DETERMINATI SU BASE STATISTICA

I **difetti occulti** sono un parametro da trattare statisticamente. Rispetto agli altri parametri locali è incognita anche l'effettiva **posizione**, il **numero** e la **gravità**.

Grandezza fisica variabile con continuità

Le **incertezze** dipendono
soltanto da:

➤ Ampiezza campione

Si sceglie in base al **livello di
confidenza** obiettivo

➤ Accuratezza prova

Si sceglie in base al livello di
approfondimento richiesto

Parametro locale NON direttamente identificabile

(difetti occulti)

Le **incertezze** dipendono da:

➤ Ampiezza campione

Si sceglie in base al **livello di
confidenza** obiettivo, ma la
POPOLAZIONE non è nota. Metodo
iterativo.

➤ Accuratezza prova

Si sceglie in base al livello di
approfondimento richiesto

Conoscenza iniziale: ispezioni speciali – parametri statisticamente determinati

PARAMETRI DETERMINATI SU BASE STATISTICA

I **difetti occulti** sono un parametro da trattare statisticamente. Rispetto agli altri parametri locali è incognita anche l'effettiva **posizione**, il **numero** e la **gravità**.

Grandezza fisica variabile con continuità

Le *incertezze* dipendono
soltanto da:

➤ Ampiezza campione

Si sceglie in base al **livello di
confidenza** obiettivo

➤ Accuratezza prova

Si sceglie in base al livello di
approfondimento richiesto

**Conoscenza
pregressa della
funzione di
distribuzione attesa**
(es.: caratteristiche
meccaniche materiali,
distribuzione carichi da
traffico...)

Parametro locale NON direttamente identificabile

(difetti occulti)

Le *incertezze* dipendono da:

➤ Ampiezza campione

Si sceglie in base al **livello di
confidenza** obiettivo, ma la
POPOLAZIONE non è nota. Metodo
iterativo.

➤ Accuratezza prova

Si sceglie in base al livello di
approfondimento richiesto

Popolazione incognita Scarsa conoscenza sulla funzione di distribuzione attesa

(es.: assenza di riempimento
nei cavi post-tesi)



Sono necessarie **ipotesi** sulla
distribuzione attesa, altrimenti
non è definibile un livello di
confidenza. **La bontà delle
ipotesi è verificata
iterativamente.**

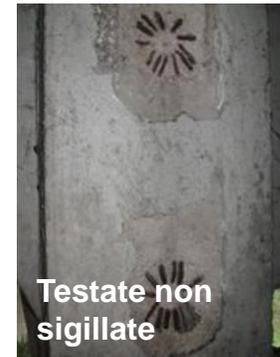
Conoscenza iniziale: ispezioni speciali – il caso degli impalcati in c.a.p. post-tesi

Le opere a cavi post-tesi rappresentano un caso emblematico. Le **ispezioni visive** sono il primo passo per il conseguimento della conoscenza di base, infatti possono essere individuati i *difetti manifesti* e i *difetti spia*.

I difetti occulti non sono identificabili.



? Difetti *occulti* ?



Conoscenza iniziale: ispezioni speciali – il caso degli impalcati in c.a.p. post-tesi

La conoscenza di base di un'opera a cavi post-tesi non è esauribile tramite le sole ispezioni visive.
La potenziale presenza di **difetti occulti** sui cavi post-tesi complica la valutazione.

Apparente buono stato di conservazione

~

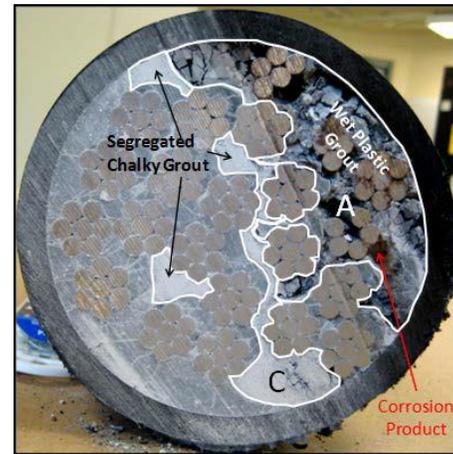
assenza di difetti spia e manifesti
(DIFETTI OCCULTI?)

Effettivo buono stato di conservazione

≠

~

assenza di difetti spia, manifesti e **OCCULTI**



Il **difetto occulto** tipico per una trave a cavi post-tesi è la corrosione del cavo che comporta la **riduzione di sezione resistente** del cavo e un potenziale infragilimento del materiale.

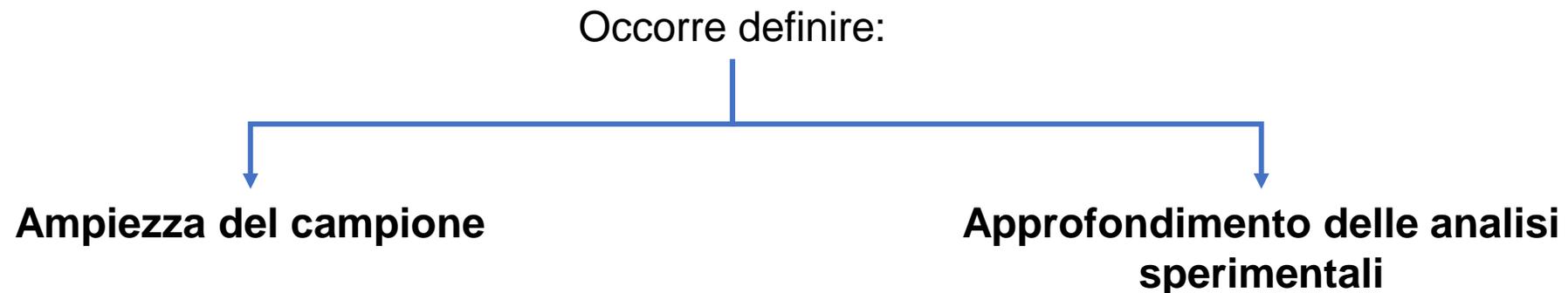
La corrosione si innesca più facilmente se l'acciaio non è protetto, quindi dove sono presenti difetti di iniezione.

Conoscenza iniziale: ispezioni speciali – il caso degli impalcati in c.a.p. post-tesi

La post-tensione è il caso più comune di presenza di
PARAMETRO LOCALE NON direttamente IDENTIFICABILE, difetto occulto

Il difetto è costituito dalla corrosione dei cavi, imputabile essenzialmente alla presenza di difetti di iniezione.

Il problema si riconduce quindi alla valutazione della presenza di cavità nella guaina.



Conoscenza iniziale: ispezioni speciali – il caso degli impalcati in c.a.p. post-tesi

AMPIEZZA DEL CAMPIONE

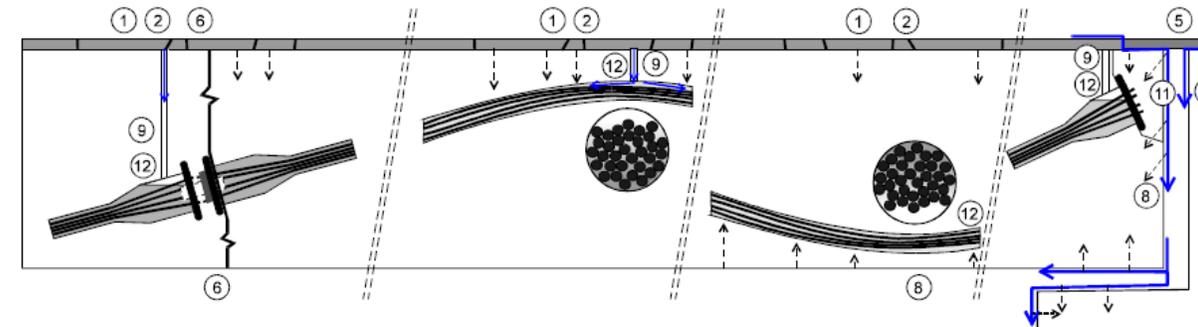
L'**ampiezza del campione**, non avendo conoscenza pregressa del parametro caratteristico del fenomeno, deve basarsi sullo **sviluppo di modelli** appropriati

È necessario studiare **famiglie geometricamente omogenee di cavi** → **popolazioni omogenee**

Un gruppo di cavi è considerato una popolazione omogenea se la probabilità di inefficacia dell'iniezione è simile.

L'**efficacia dell'iniezione** è fortemente dipendente dalla geometria del tracciato dei cavi:

in presenza di **cambi di curvatura** e/o di **raggi di curvatura ridotti**, è più probabile che l'iniezione sia insufficiente (ZONE CRITICHE).



Conoscenza iniziale: ispezioni speciali – il caso degli impalcati in c.a.p. post-tesi

AMPIEZZA DEL CAMPIONE

L'**ampiezza del campione**, non avendo conoscenza pregressa del parametro caratteristico del fenomeno, deve basarsi sullo **sviluppo di modelli** appropriati

Al fine di valutare l'ampiezza del campione occorre preliminarmente determinare la probabilità che, su una popolazione omogenea di N cavi, avendo eseguito n indagini su altrettanti cavi ed avendo estratto k elementi difettosi, siano m il numero di cavi difettosi sull'intera popolazione.

In particolare, al fine di **minimizzare le indagini**, è possibile fissare $k=1$, valutando la probabilità associata.

Tale probabilità è, di fatto, la fiducia che si ripone nell'esito delle indagini, cioè **la confidenza**.

Essendo, di fatto, un caso di valutazione statistica di estrazioni senza reimmissione e dovendo indagare un'unica caratteristica, è possibile adottare utilmente la **DISTRIBUZIONE IPERGEOMETRICA** (*FHWA-HRT-13-028*).

Conoscenza iniziale: ispezioni speciali – il caso degli impalcati in c.a.p. post-tesi

AMPIEZZA DEL CAMPIONE

DISTRIBUZIONE IPERGEOMETRICA

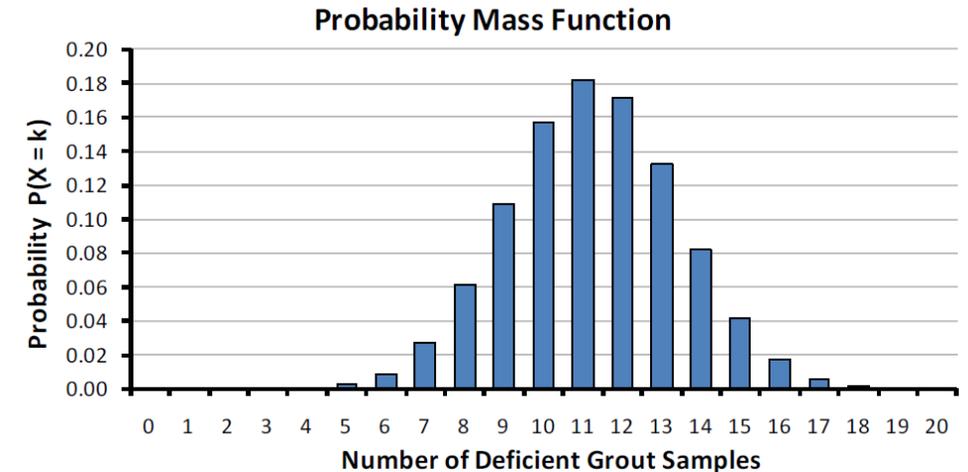
$$P(X = k) = \frac{\binom{m}{k} \binom{N-m}{n-k}}{\binom{N}{n}}$$

m : campione difettoso

n : numero di campioni da indagare

N : popolazione omogenea

k : numero di volte che il campione risulta difettoso



L'ampiezza del campione n è definita:

- ipotizzando che siano presenti m elementi difettosi nella popolazione
- Stabilendo una certa **probabilità** (confidenza)

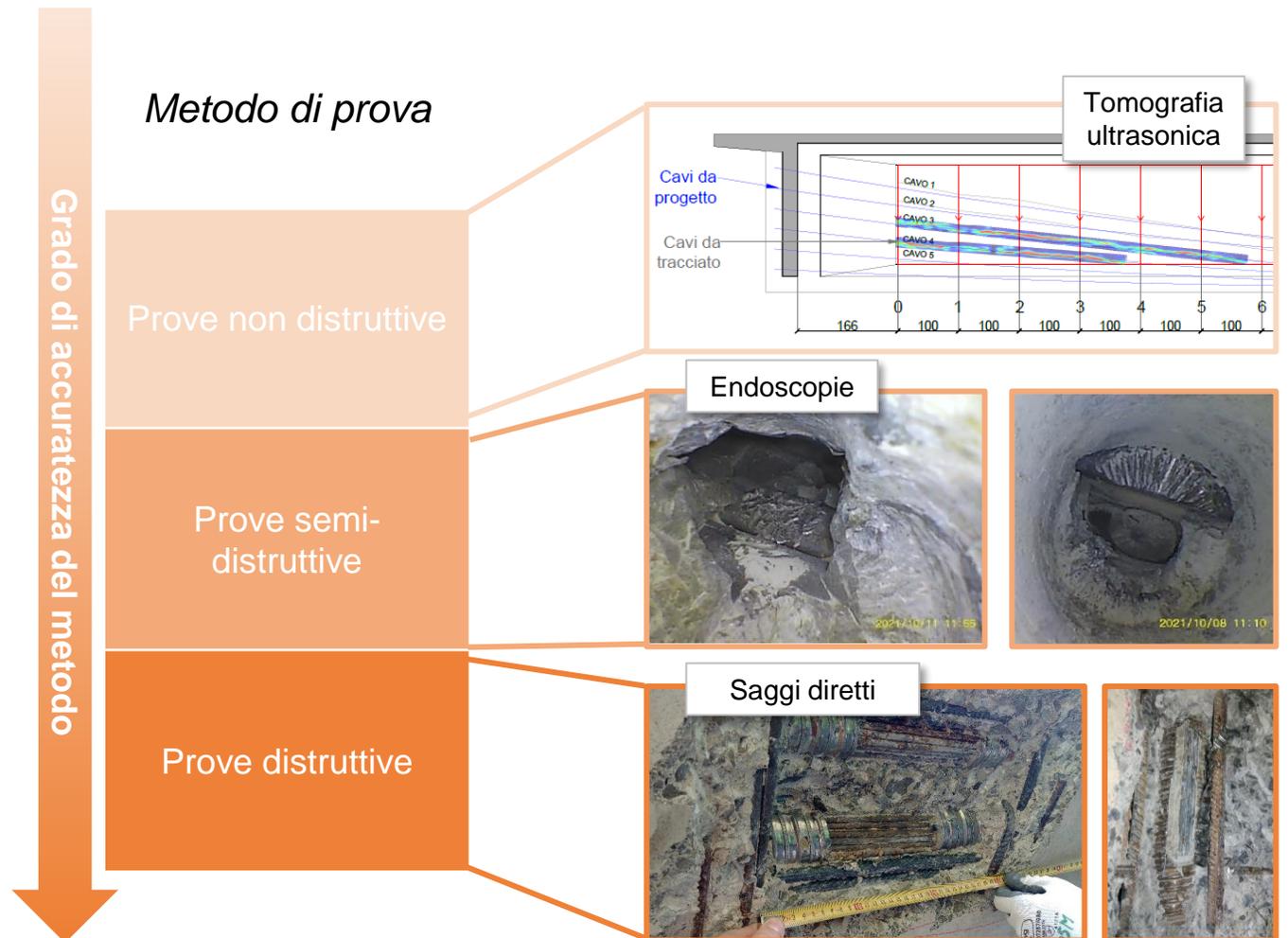
Le FHWA propongono di eseguire le prove su due livelli di confidenza (75% e 95%), distinguendo due livelli di ispezione.

Conoscenza iniziale: ispezioni speciali – il caso degli impalcati in c.a.p. post-tesi

APPROFONDIMENTO DELLE ANALISI SPERIMENTALI

L'approfondimento delle analisi sperimentali è indispensabile per l'individuazione dei **difetti occulti**.

La ricerca dei difetti occulti deve essere eseguita **aumentando l'accuratezza** della metodologia di prova ogni volta che il **risultato** dell'indagine sia eccessivamente **incerto**.

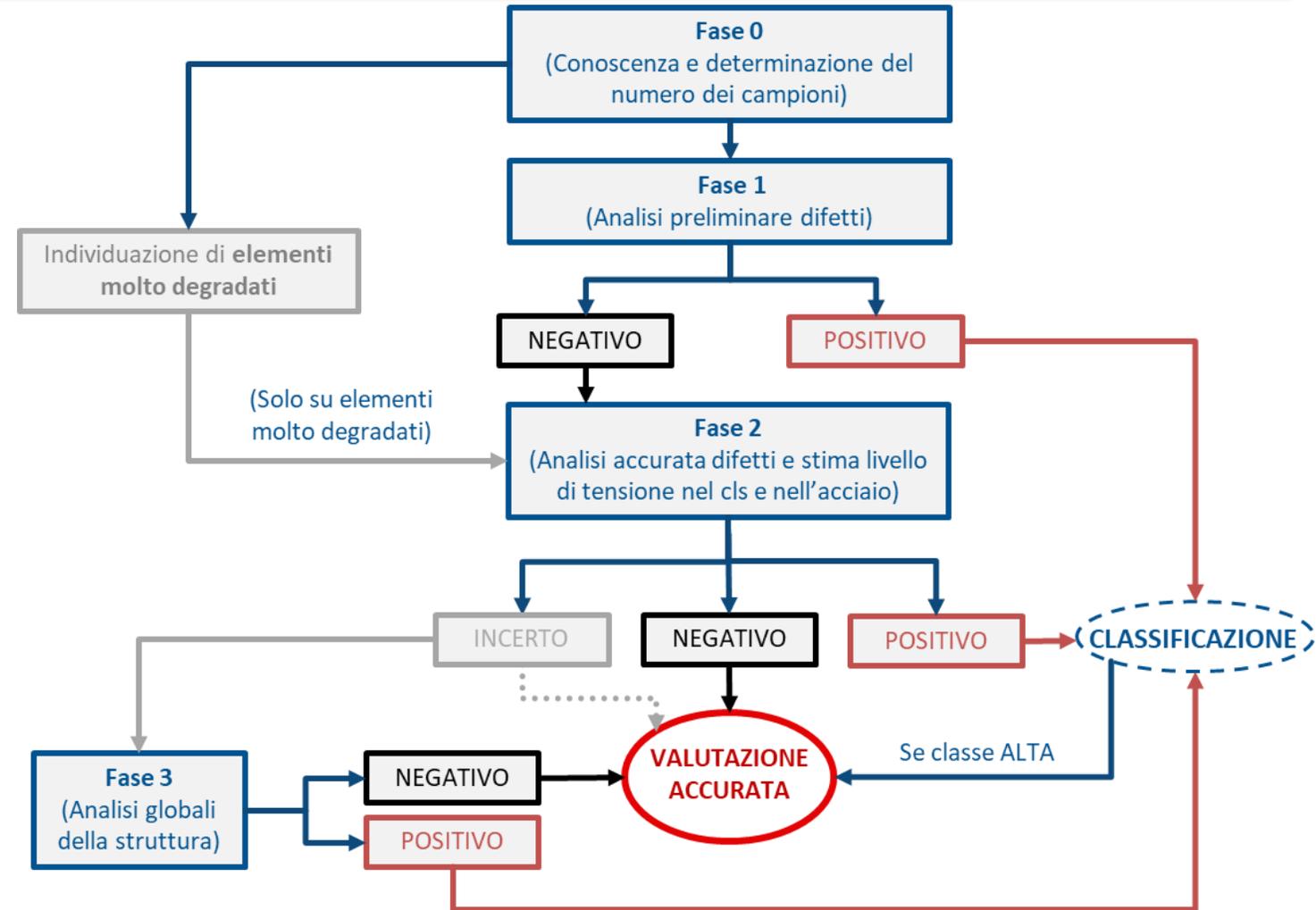


Conoscenza iniziale: ispezioni speciali – il caso degli impalcati in c.a.p. post-tesi

FLUSSO METODOLOGICO DELLE ISPEZIONI SPECIALI

Combinando il procedimento proposto per la determinazione del numero dei campioni e quello per l'approfondimento delle analisi sperimentali, ne deriva uno **iterativo**.

Nel caso si rilevino difetti è necessario approfondire progressivamente le indagini; le metodologie di indagine impiegate devono essere tanto più accurate quanto più il difetto appaia grave.



Conoscenza iniziale: ispezioni speciali – parametri statisticamente definiti

DALL'ISPEZIONE SPECIALE ALLA DEFINIZIONE **PROBABILISTICA** DEGLI SCENARI DI DANNO:

- **Conoscenza dal passato**
 - dal Livello 0: analisi delle passate ispezioni visive, delle valutazioni idrauliche e di stabilità dei terreni
 - dal Livello 0: analisi degli eventuali dissenti provocati da difetti occulti nella rete
- **Stato attuale**
 - esecuzione delle ispezioni speciali come da LLGG e da sviluppi scientifici e tecnologici recenti
 - utilizzo di metodi di rilievo per la realizzazione del modello fotogrammetrico digitale
 - tecniche di IA per il riconoscimento, la localizzazione e la quantificazione dei difetti manifesti
 - utilizzo di metodi di analisi dati per la definizione probabilistica degli scenari di danno / rischio
 - utilizzo di metodi di analisi dati per la definizione di criteri di progettazione delle ispezioni speciali per definiti livelli di confidenza
- **Monitoraggio a livello territoriale**
 - utilizzo dei metodi di analisi dati e IA per la valutazione dell'evoluzione degli di danno / rischio

L'importanza della conoscenza nel processo di gestione dei ponti esistenti

CONOSCENZA

Ai fini della progressiva piena conoscenza delle opere, occorre riconoscere, localizzare e quantificare:

- **Situazioni evolutive di danno e degrado** delle opere;
- **Rischi naturali interferenti** (frana, sisma, rischio idraulico);
- **Azioni di elevata intensità non previste** nel progetto (vento, temperatura, traffico eccezionale).



Conoscenza di base: classificazione delle opere sulla base dei rischi presenti

DALLA CLASSIFICAZIONE AL MONITORAGGIO DEGLI SCENARI DI DANNO E FENOMENI INTERFERENTI

- **Conoscenza dal passato**

- Dal Livello 0 e Livello 1: analisi delle ispezioni e classificazioni pregresse delle opere, conoscenza dal passato e dal monitoraggio territoriale

- **Stato attuale**

- Valutazione della classe di attenzione attuale, definizione degli scenari di danno di rischio e dei relativi indicatori
- Monitoraggio dell'evoluzione degli eventuali scenari di danno e di fenomeni di degrado
- Monitoraggio delle possibili interferenze con rischi naturali (frana, sisma, idraulico) e azioni eccezionali

- **Conoscenza predittiva**

- Utilizzo dei metodi di analisi dati e IA per elaborazione dei dati acquisiti attraverso classificazione delle opere e monitoraggio; individuazione di schemi evolutivi e relazioni tra i vari parametri monitorati

Conoscenza di base: classificazione delle opere sulla base dei rischi presenti

MONITORAGGIO *BASATO SUI DATI*

Sistemi di monitoraggio strutturale predittivi in grado di rilevare le **criticità rilevanti** ed eventualmente **localizzarle e quantificarne la severità** esclusivamente basati sui dati.

- ✓ Applicabile a ponti con fenomeni di danneggiamento **in atto e controllabili**.
- ✓ Applicabile a ponti senza apparenti fenomeni di danneggiamento, per **monitorarne l'eventuale comparsa**.

L'**analisi** del dato può avvenire in maniera **non supervisionata e automatizzata** mediante sviluppo di metodi di analisi statistica multivariata.



Al-Khateeb et al. «Structural Health Monitoring of a Cable-Stayed Bridge Using Regularly Conducted Diagnostic Load Tests»

Conoscenza di base: classificazione delle opere sulla base dei rischi presenti

MONITORAGGIO *BASATO SUI DATI*

Il sistema di monitoraggio deve essere progettato in modo da poter rilevare gli indicatori associati agli scenari di danno e di rischio individuati

Gli scenari di danno devono tener conto di:

- Possibili fenomeni di degrado;
- Perdita di rigidità localizzata;
- Perdita di rigidità globale;
- Spostamenti non compatibili con le ipotesi di calcolo

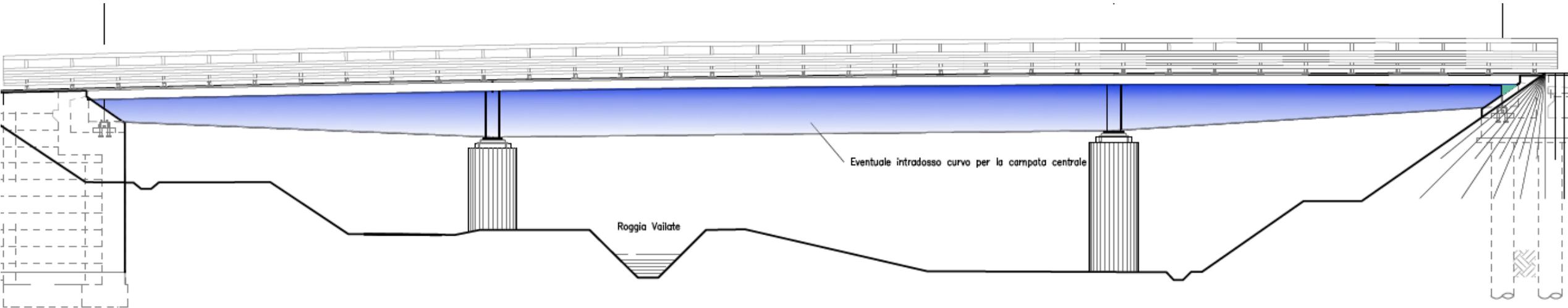
Gli scenari di rischio devono tener conto di:

- Interferenze col territorio circostante;
- Eventi naturali estremi possibili.

Gli indicatori di danno sono **parametri direttamente misurabili** per mezzo di sensori che sono **causati** da uno o più **scenari di danno o rischio** in atto

Conoscenza di base: classificazione delle opere sulla base dei rischi presenti

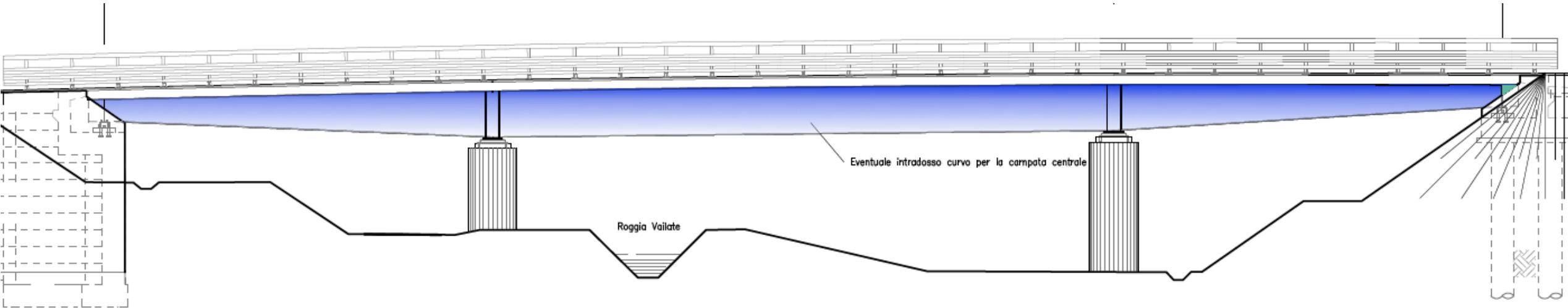
MONITORAGGIO BASATO SUI DATI – Esempio: Viadotto con impalcato continuo a struttura mista acciaio-calcestruzzo



| Scenari di danno | Indicatori di danno | Sensoristica |
|--|--|--|
| Perdita di rigidità dell'impalcato. | Rotazione o deformazione della trave di impalcato. | Inclinometri |
| Perdita di verticalità (cedimenti) di pile e spalle | Rotazione delle spalle e delle pile. | Inclinometri e/o accelerometri triassiali MEMS |
| Riduzione della funzionalità dei pali o cedimenti della fondazione | Deformazione dei pali e variazioni di carico sui pali. | Estensimetri in fibra ottica da posizionare nel corpo in c.a. del palo |
| Perdita di funzionalità o fine corsa dispositivi di vincolo | Spostamenti relativi tra componenti strutturali, carico agente sull'appoggio | Trasduttori di spostamento e celle di carico o appoggi strumentati per il rilievo di movimenti e carico agente |

Conoscenza di base: classificazione delle opere sulla base dei rischi presenti

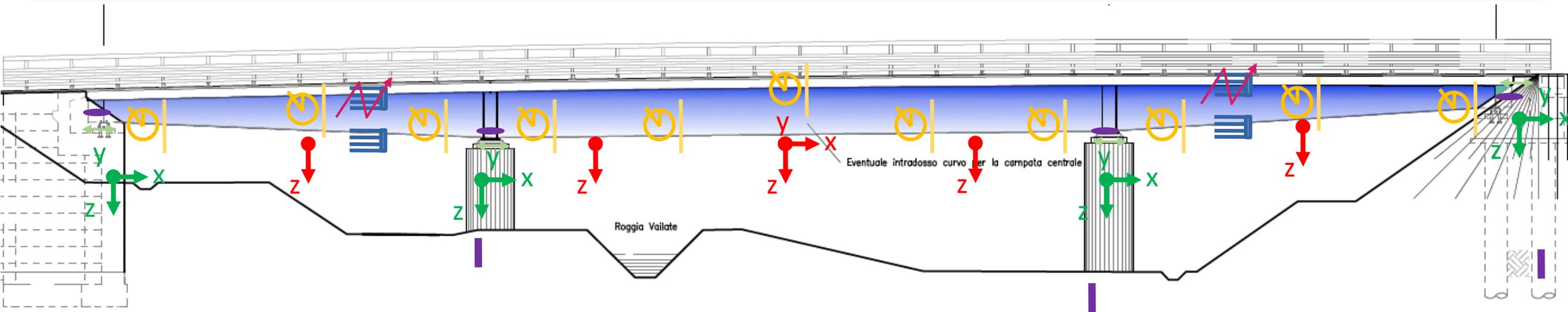
MONITORAGGIO BASATO SUI DATI – Esempio: Viadotto con impalcato continuo a struttura mista acciaio-calcestruzzo



| Scenari di danno | Indicatori di danno | Sensoristica |
|---|--|---|
| Perdita di rigidità a causa di degrado diffuso (fessurazioni, danneggiamento a seguito di un evento sismico o di un carico eccezionale) | Comportamento dinamico dell'opera | Accelerometri per caratterizzazione dinamica |
| Corrosione della struttura in acciaio a seguito del danneggiamento del rivestimento (zone a maggior rischio di ristagno di acqua) | Degrado e velocità di corrosione al di sotto del rivestimento degli elementi metallici | Elettrodi per la misura del degrado del rivestimento e della velocità di corrosione |
| Scenari di rischio da azioni eccezionali | Indicatori di danno | Sensoristica |
| Vibrazioni indotte da eventi sismici | Accelerazione – sommità delle pile | Accelerometri sismici |
| Danneggiamento causato dal passaggio di carichi eccezionali | Monitoraggio del traffico | Sistema di pese dinamiche |

Conoscenza di base: classificazione delle opere sulla base dei rischi presenti

MONITORAGGIO BASATO SUI DATI – Esempio: Viadotto con impalcato continuo a struttura mista acciaio-calcestruzzo



↔ Monitoraggio degli spostamenti dei sistemi di vincolo

■ Monitoraggio della funzionalità del palo (estensimetri FOS da inserire nel getto)

≡ Monitoraggio degrado rivestimento

⚡ Monitoraggio velocità corrosione acciaio

○ Monitoraggio delle azioni trasmesse ai dispositivi di vincolo (cella di carico)

⊙ | Monitoraggio variazione della deformata longitudinale e trasversale (inclinometro biassiale)

z ↓ Accelerometri in dir. Z (impalcato)

y ● Accelerometri in dir. Y (impalcato)

} Monitoraggio nel tempo delle caratteristiche modali del viadotto (frequenze + forme modali)

xyz Accelerometri triassiali (pile/spalle) → Scuotimento da sisma

Conoscenza di base: classificazione delle opere sulla base dei rischi presenti

MONITORAGGIO *BASATO SUI DATI*

Sistemi di monitoraggio strutturale predittivi in grado di rilevare le **criticità rilevanti** ed eventualmente **localizzarle e quantificarne la severità** esclusivamente basati sui dati.

METODOLOGIA

1. Valutazione possibili criticità, meccanismi di collasso e scenari di rischio in relazione a:
 - **Situazioni evolutive di danno e degrado** delle opere (per le opere esistenti, eventualmente riscontrati dal Livello 1; per le opere nuove, quelle possibili in funzione di materiali e tipologia strutturale);
 - **Rischi naturali interferenti** (frana, sisma, rischio idraulico);
 - **Azioni di elevata intensità non previste** nel progetto (vento, temperatura, traffico eccezionale).
2. Progetto della sensoristica tipo per tipologie rilevanti
3. Sviluppo dell'impianto hardware e software per lettura e analisi dati.
4. Utilizzo dell'analisi dati e IA per calibrazione scenari di danno e di rischio, progetto monitoraggio e analisi dei risultati.

L'importanza della conoscenza nel processo di gestione dei ponti esistenti

CONOSCENZA

Ai fini della progressiva piena conoscenza delle opere, occorre riconoscere, localizzare e quantificare:

- **Situazioni evolutive di danno e degrado** delle opere;
- **Rischi naturali interferenti** (frana, sisma, rischio idraulico);
- **Azioni di elevata intensità non previste** nel progetto (vento, temperatura, traffico eccezionale).



Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

DALLA VALUTAZIONE DI SICUREZZA AL MONITORAGGIO SUPPORTATO DAL MODELLO

- **Conoscenza dal passato**

- Dal Livello 0 e Livello 1: analisi delle ispezioni e classificazioni pregresse e dal monitoraggio territoriale
- Dal Livello 2: informazioni sulla risposta strutturale dell'opera alle azioni esterne

- **Stato attuale**

- Sviluppo di approccio basato sul calcolo dell'affidabilità strutturale / progetto di indagini → riduzione delle incertezze – utilizzo tecniche analisi dati e IA
- Progetto e nuova installazione o integrazione del sistema di monitoraggio relativo a possibili scenari di danno
- Realizzazione e aggiornamento del modello basato su i dati del monitoraggio

- **Conoscenza predittiva**

- **Analisi predittive deterministiche e simulazioni di scenari di danno** integrando il modello strutturale con i dati di monitoraggio acquisiti nel tempo – utilizzo tecniche analisi dati e IA

Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

La conoscenza per una valutazione accurata del sistema strutturale deve consentire una corretta stima dell'affidabilità strutturale del sistema confrontando

Probabilità di fallimento strutturale **VS** Probabilità accettabile di fallimento

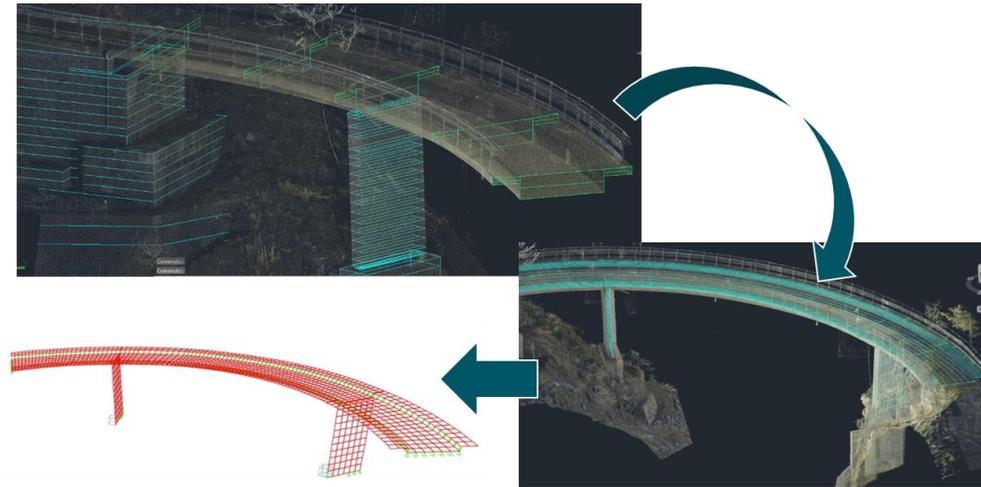
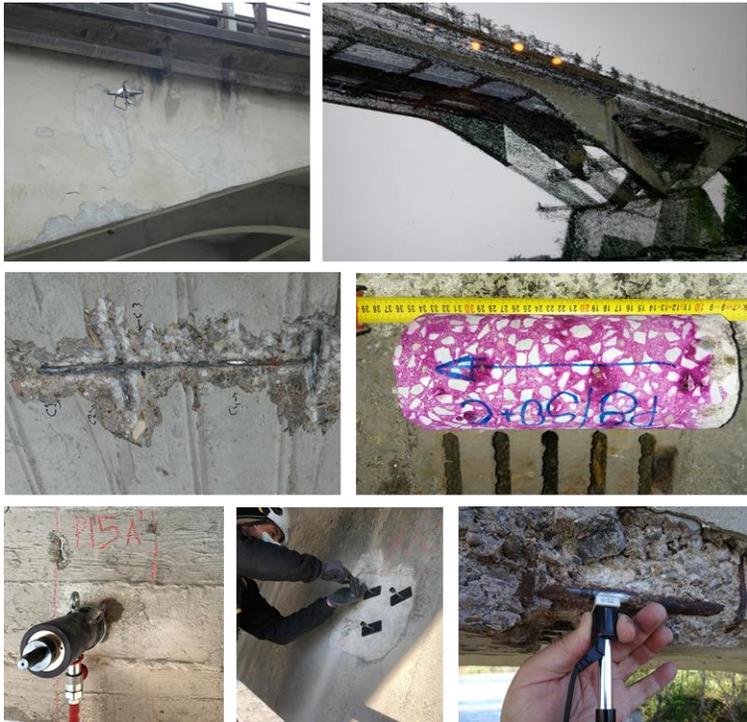
È necessario definire i **modelli** dei parametri **locali**, sia univocamente determinati, sia statistici, e dei parametri **globali**.
I modelli permettono il **confronto** tra la **probabilità di fallimento della struttura** e una **probabilità di fallimento accettabile**.

| | | Incertezze: | | |
|-------------------|---|---|---|-------------|
| Conoscenza | { | • Parametri locali naturali (caratteristiche dei materiali...); | → | Aleatorie |
| | | • Parametri locali agenti (traffico, degrado...); | → | Epistemiche |
| | | • Definizione di modelli di resistenza e di risposta; | → | Di modello |
| | | • Definizione dell'ampiezza campionaria per ogni parametro. | → | Statistiche |

Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

MONITORAGGIO e INDAGINI APPROFONDITE PER LA RIDUZIONE DELLE INCERTEZZE

CAPACITÀ

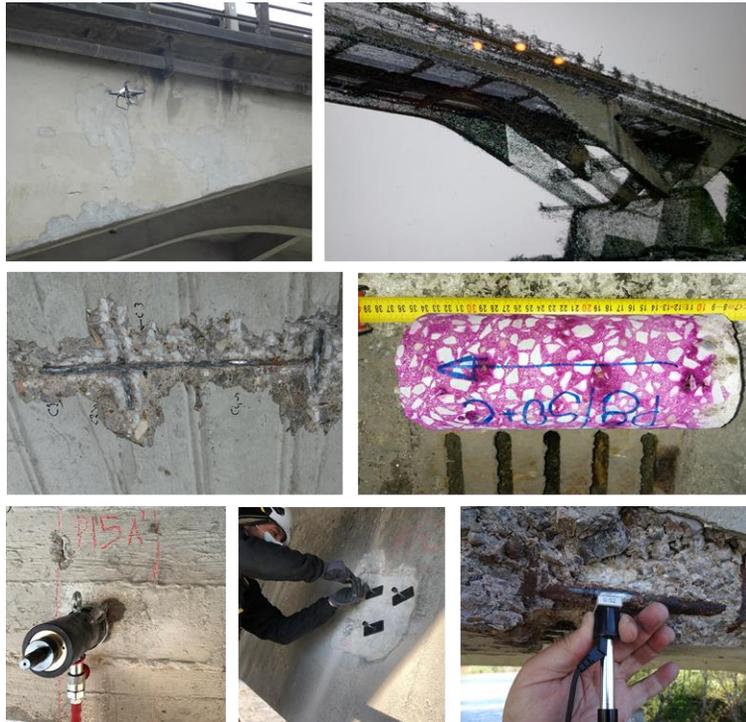


- ✓ Ispezioni con drone
- ✓ Laser scanner
- ✓ Prove di durezza sull'acciaio
- ✓ Prove a compressione su provini in calcestruzzo
- ✓ Prove non distruttive sul calcestruzzo
- ✓ Analisi modale operativa (OMA)

Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

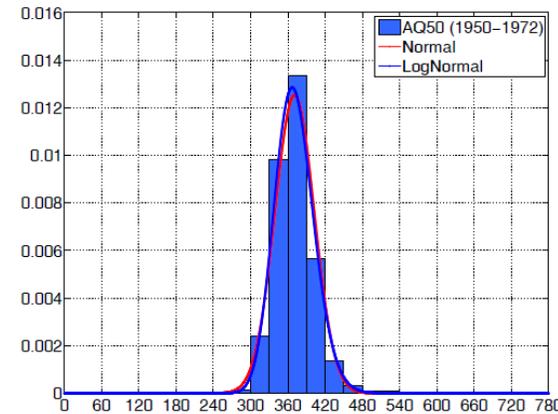
MONITORAGGIO e INDAGINI APPROFONDITE PER LA RIDUZIONE DELLE INCERTEZZE

CAPACITÀ

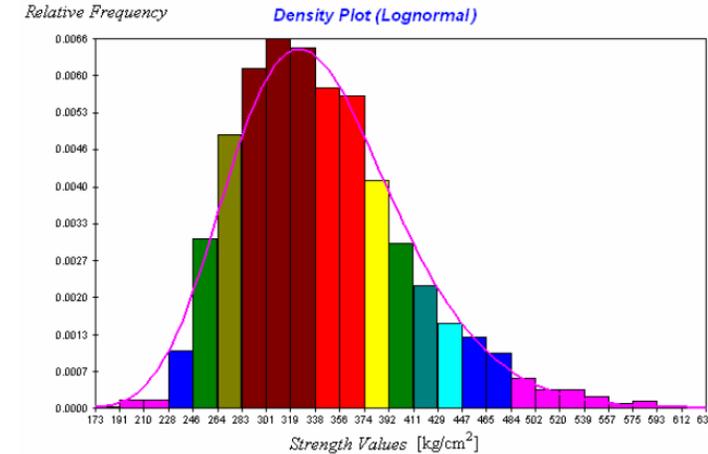


Definizione probabilistica dei parametri rilevanti LOCALI

acciaio



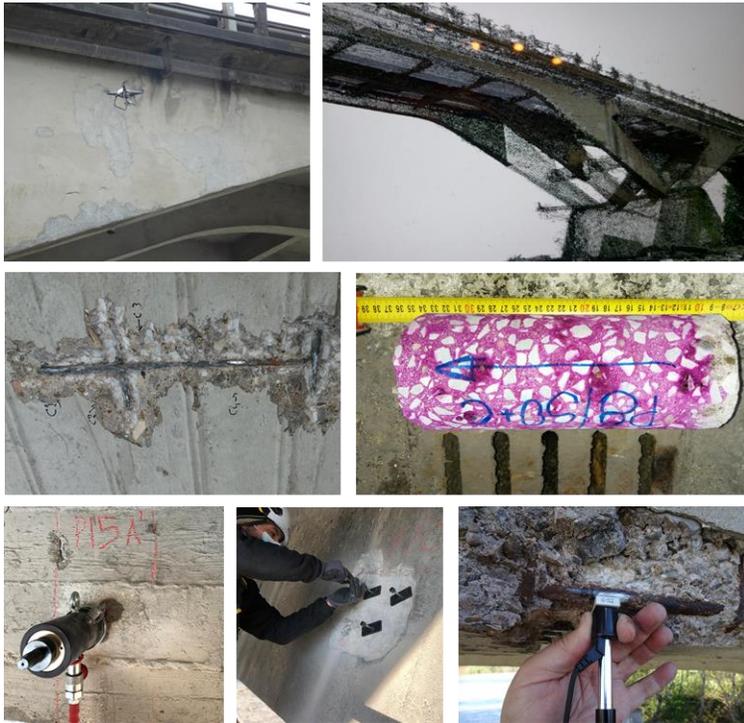
calcestruzzo



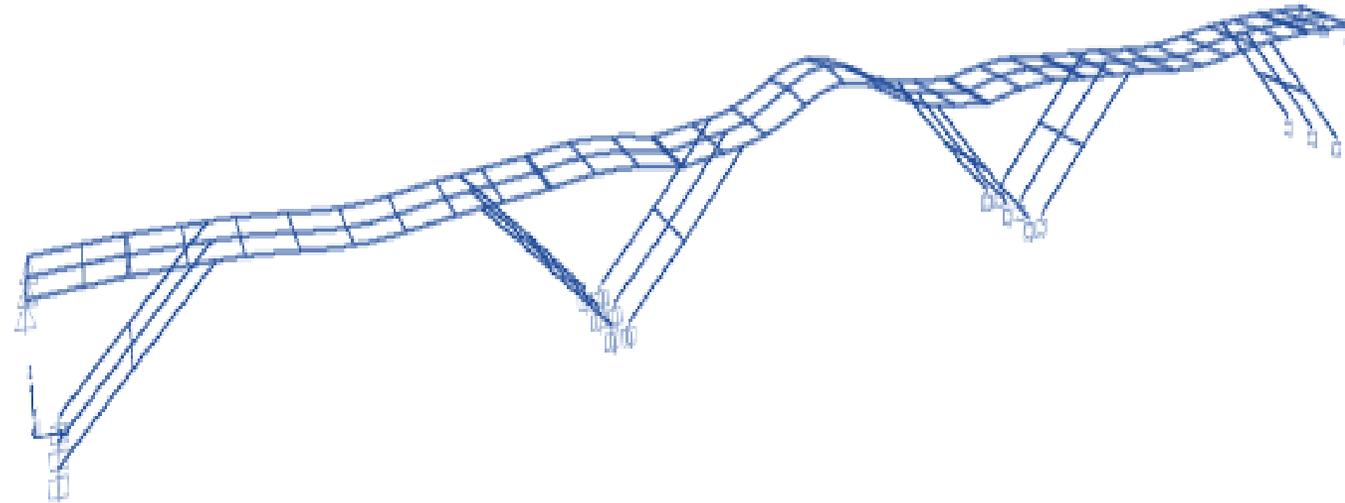
Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

MONITORAGGIO e INDAGINI APPROFONDITE PER LA RIDUZIONE DELLE INCERTEZZE

CAPACITÀ



Calibrazione del modello agli elementi finite sulla base delle frequenze rielaborate dall'analisi dinamica operativa.



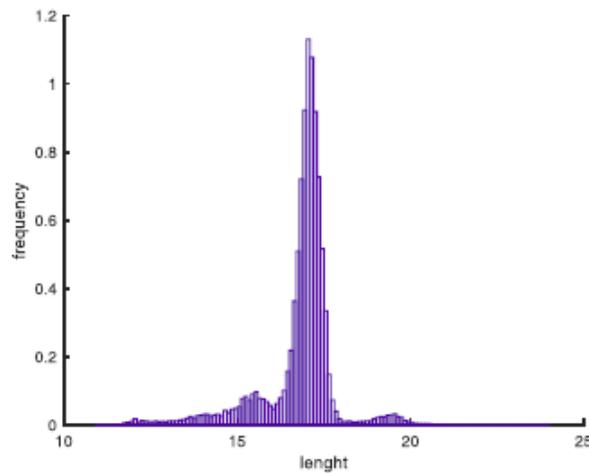
Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

MONITORAGGIO e INDAGINI APPROFONDITE PER LA RIDUZIONE DELLE INCERTEZZE

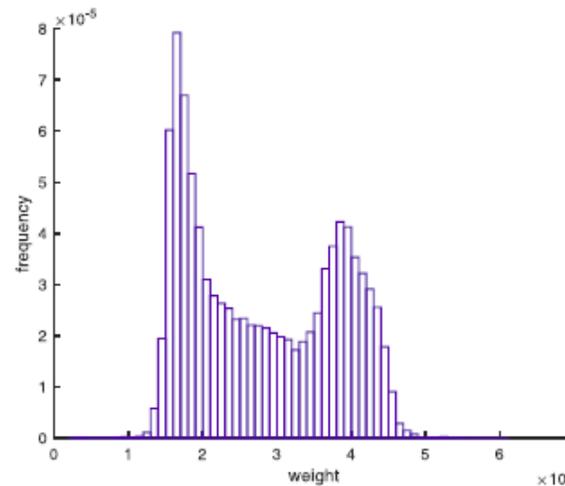
Installazione sistemi di pesa dinamica per monitoraggio e identificazione carico da traffico reale.

DOMANDA

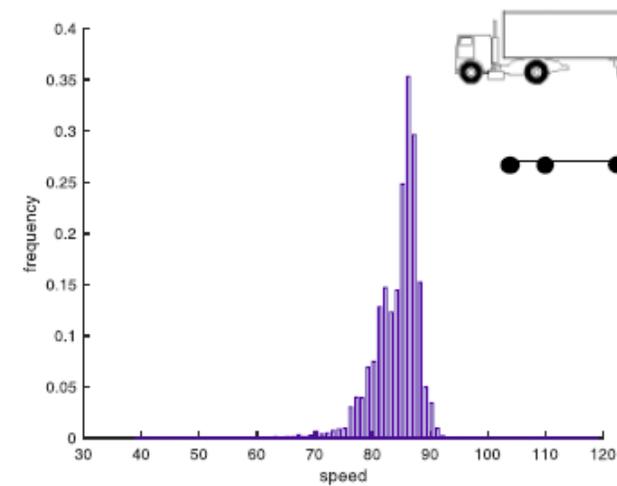
Definizione della funzione di densità di probabilità dell'azione del traffico.



| Cat. F Length [m] | | |
|-------------------|-------|------|
| pi | μi | σi |
| 0,0506 | 16,08 | 1,10 |



| Cat. F Weight [kg] | | |
|--------------------|-------|------|
| pi | μi | σi |
| 0,0506 | 28023 | 9916 |



| Cat. F Speed [km/h] | | |
|---------------------|-------|------|
| pi | μi | σi |
| 0,0506 | 84,03 | 3,99 |

Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

MONITORAGGIO e INDAGINI APPROFONDITE PER LA RIDUZIONE DELLE INCERTEZZE

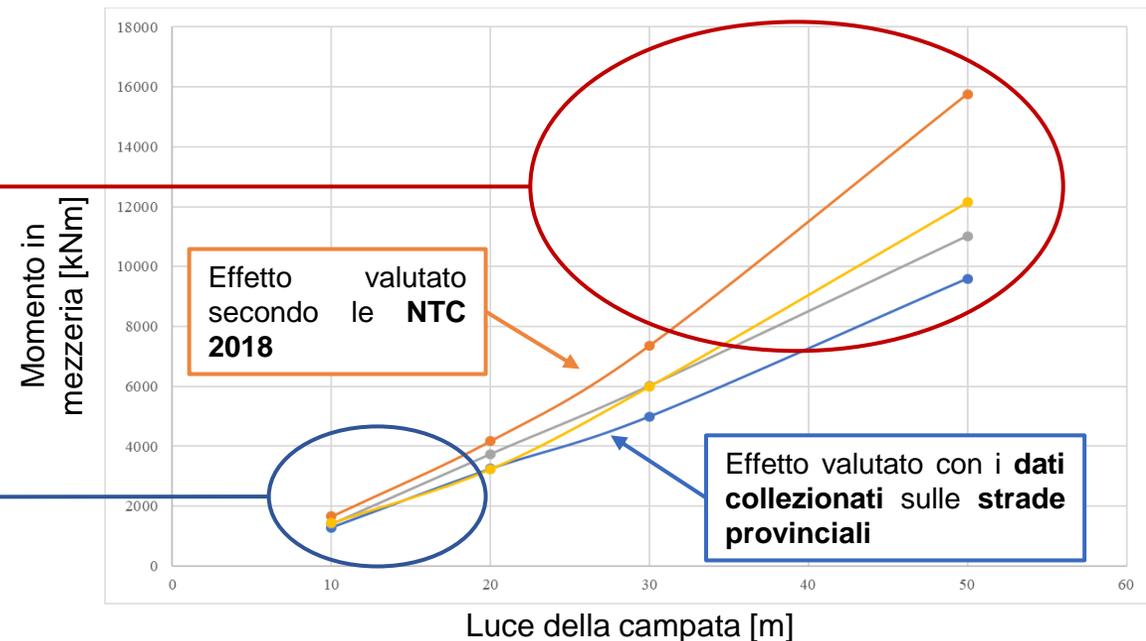
Installazione sistemi di pesa dinamica per monitoraggio e identificazione carico da traffico reale.

Elaborazione del modello statistico e confronto con valori di norma

DOMANDA

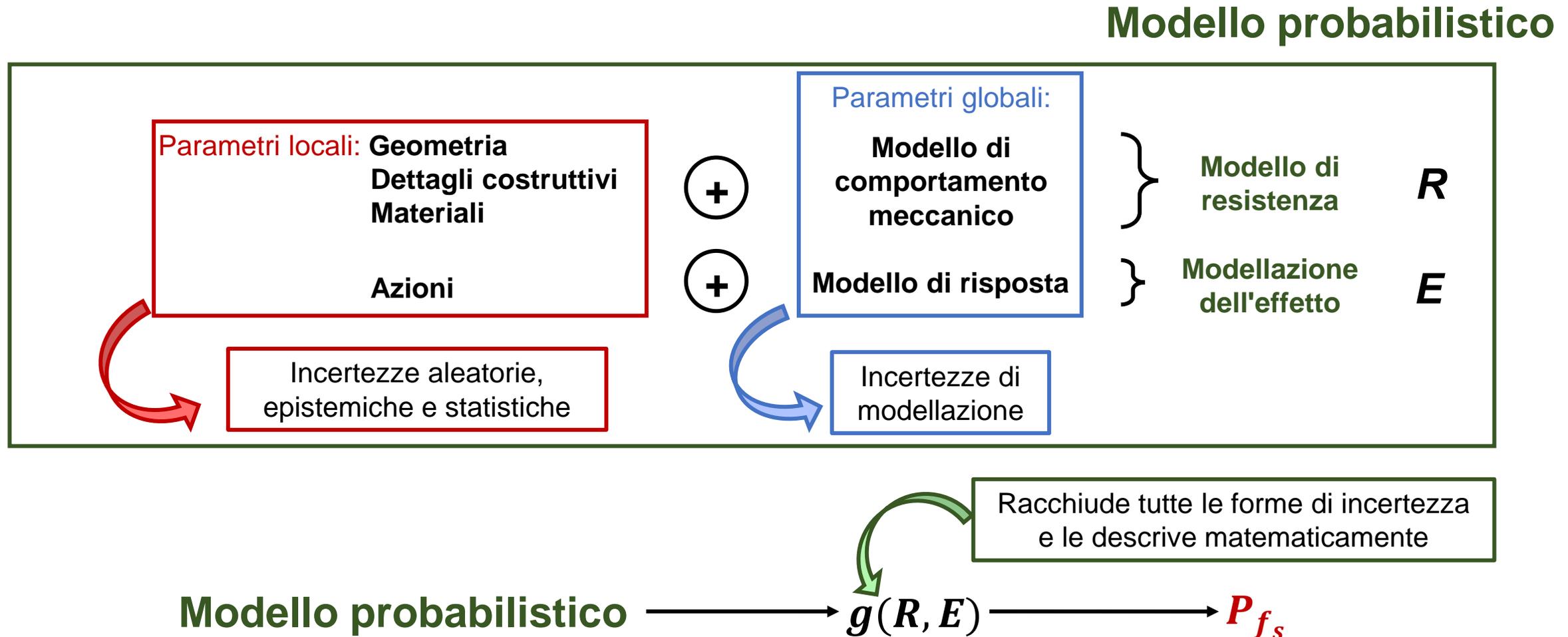
Per **grandi luci** le azioni valutate col modello sono **molto inferiori** a quelle da **normativa**

Per **piccole luci** le azioni valutate col modello sono **paragonabili** a quelle da **normativa**



Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

La valutazione della probabilità di fallimento necessita di un modello probabilistico che racchiuda tutte le incertezze



Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

Stima dei parametri per le funzioni di distribuzione delle variabili di base.

L'ampiezza campionaria deve consentirne la stima con un adeguato livello di confidenza.

La valutazione del numero di prove dipende dalla presenza o meno di conoscenza pregressa sui parametri e dalla definizione di un livello di confidenza adeguato.

Il **livello di confidenza** esprime la **probabilità** che un certo intervallo di valori contenga il **parametro della funzione** di distribuzione ricercato.

Per la media
Distribuzione Normale

$$CI = \bar{x} \pm z_{1-\frac{\alpha}{2}} * \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Intervallo di confidenza Livello di confidenza Ampiezza campionaria

Aumentare l'ampiezza del campione perciò **riduce** l'ampiezza dell'intervallo di confidenza, e rende la **stima del parametro più accurata**

Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

Impalcati di c.a.p. a cavi post-tesi

Gli impalcati a cavi post-tesi rappresentano una casistica particolare, in quanto la possibile presenza di difetti occulti influisce sostanzialmente sulla capacità.

L'area residua del cavo è un parametro statistico non direttamente identificabile, perché dipendente dalla presenza di **difetti occulti**.

$$R_{py} = A_{res} \cdot f_{py}$$

È necessario valutare la resistenza del cavo considerando eventuali fenomeni di degrado e danneggiamento, valutando l'**AREA RESIDUA**.

L'obiettivo è definire la **resistenza dei cavi** (R_{py}), ovvero l'area residua e le caratteristiche meccaniche dell'acciaio, calibrando il numero delle prove in base a un **Livello di Conoscenza** e a un **Fattore di Confidenza** obiettivo.

Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

Impalcati di c.a.p. a cavi post-tesi

$$R_{py} = A_{res} \cdot f_{py}$$

Diagram illustrating the relationship between LC (Left Column) and FC (Right Column) in the context of the equation $R_{py} = A_{res} \cdot f_{py}$. Red arrows point from A_{res} to LC and from f_{py} to FC. A double-headed red arrow connects LC and FC.

È necessario valutare la resistenza del cavo considerando eventuali fenomeni di degrado e danneggiamento, valutando l'**AREA RESIDUA**.

Il numero di prove da eseguire è determinato secondo **procedimenti differenti**, dipendenti dalla **caratteristica** studiata.

Area residua
del cavo

LC

Probabilità di trovare almeno 1 elemento difettoso e che l'ipotesi assunta sulla difettosità sia vera

CONFIDENZA

Tensione a
snervamento
dell'acciaio

FC

Scostamento tra la media campionaria e la media della popolazione

**ESAUSTIVITÀ
delle indagini**

Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

OBIETTIVO

Valutazione del **livello di sicurezza dell'opera e/o dell'indice di affidabilità strutturale**
per ogni stato limite individuato.

Metodologia

- ✓ **Conoscenza** preliminare, **sviluppo di un modello preliminare di calcolo** dell'opera e individuazione dei **parametri rilevanti**.
- ✓ Valutazione degli **stati limite**.
- ✓ Installazione del sistema di monitoraggio mirato alla valutazione dei **parametri rilevanti**.
- ✓ **Calibrazione dei parametri rilevanti e del modello agli elementi finiti** sulla base delle **informazioni ricavate dal sistema di monitoraggio**.
- ✓ Valutazione del **livello di sicurezza e/o calcolo dell'indice di affidabilità al tempo 0**.

Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

Monitoraggio della singola opera nel suo contesto – *MONITORAGGIO MODEL BASED*

OBIETTIVO

Valutazione del **livello di sicurezza dell'opera e/o dell'indice di affidabilità strutturale**
per ogni stato limite individuato.

Applicazione del metodo al PONTE DE LA BOTTE



Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

Monitoraggio della singola opera nel suo contesto – **MONITORAGGIO MODEL BASED**

OBIETTIVO

Valutazione del **livello di sicurezza dell'opera e/o dell'indice di affidabilità strutturale** per ogni stato limite individuato.

Applicazione del metodo al PONTE DE LA BOTTE

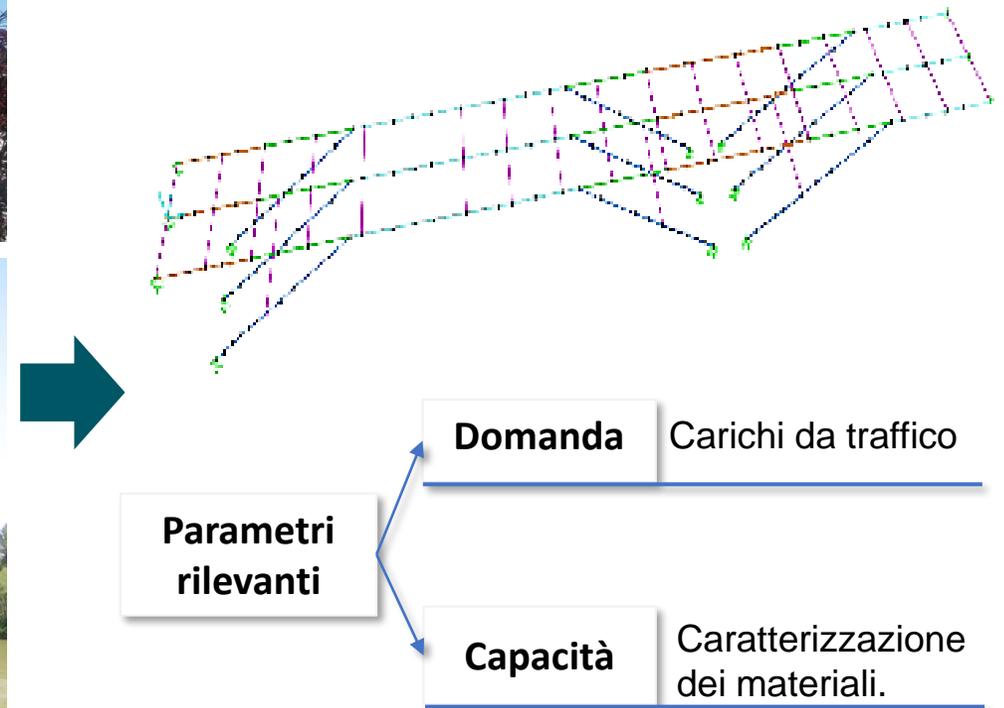
- 3 **travi longitudinali** per ogni campata, connesse da **soletta e traversi in C.A.**
- 3 campate con **comportamento ad arco**
- 4 travi tampone appoggiate su **selle Gerber**



Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

MONITORAGGIO *MODEL BASED* - Applicazione al **PONTE DE LA BOTTE**

- ✓ **Conoscenza** preliminare, sviluppo di un **modello preliminare di calcolo** dell'opera e individuazione dei **parametri rilevanti**.
- ✓ Valutazione degli **stati limite**.
- ✓ Installazione del sistema di monitoraggio mirato alla valutazione dei **parametri rilevanti**.
- ✓ Calibrazione dei **parametri rilevanti** e del modello agli **elementi finiti** sulla base delle informazioni ricavate dal sistema di monitoraggio.
- ✓ Valutazione del **livello di sicurezza** e/o calcolo dell'**indice di affidabilità**.



Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

MONITORAGGIO MODEL BASED - Applicazione al PONTE DE LA BOTTE

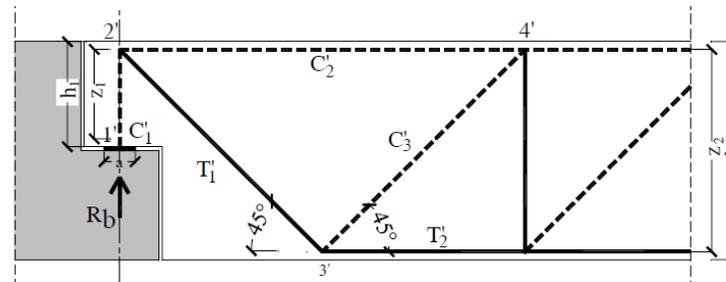
- ✓ Conoscenza preliminare, sviluppo di un modello preliminare di calcolo dell'opera e individuazione dei parametri rilevanti.
- ✓ Valutazione degli **stati limite**.
- ✓ Installazione del sistema di monitoraggio mirato alla valutazione dei parametri rilevanti.
- ✓ Calibrazione dei parametri rilevanti e del modello agli elementi finiti sulla base delle informazioni ricavate dal sistema di monitoraggio.
- ✓ Valutazione del livello di sicurezza e/o calcolo dell'indice di affidabilità.

Stati limite associati alla trave tampone

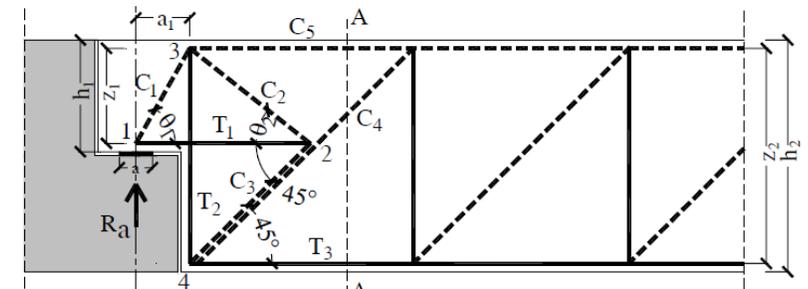
→ **Momento positivo** in mezzeria

$$g = M_R - M_E = 0 \quad \text{Funzione limite}$$

→ Rottura per **taglio** delle selle gerber



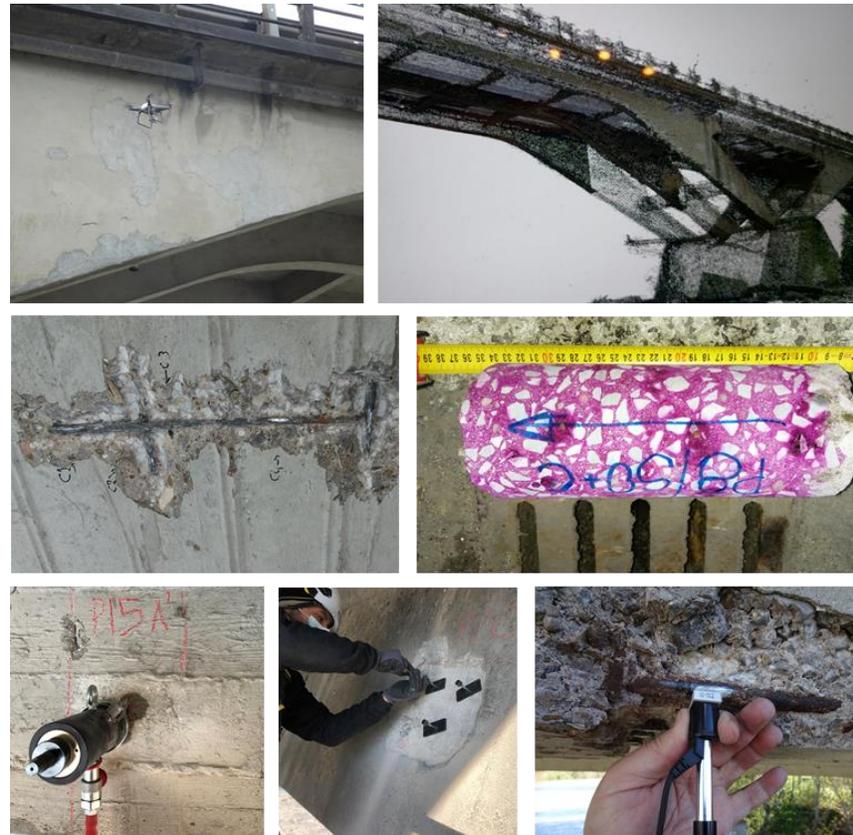
Possibili meccanismi resistenti



Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

MONITORAGGIO MODEL BASED - Applicazione al PONTE DE LA BOTTE

- ✓ Conoscenza preliminare, sviluppo di un modello preliminare di calcolo dell'opera e individuazione dei parametri rilevanti.
- ✓ Valutazione degli stati limite.
- ✓ Installazione del **sistema di monitoraggio** mirato alla valutazione dei **parametri rilevanti**.
- ✓ Calibrazione dei parametri rilevanti e del modello agli elementi finiti sulla base delle informazioni ricavate dal sistema di monitoraggio.
- ✓ Valutazione del livello di sicurezza e/o calcolo dell'indice di affidabilità.



- ✓ Ispezioni con drone
- ✓ Laser scanner
- ✓ Prove di durezza sull'acciaio
- ✓ Prove a compressione su provini in calcestruzzo
- ✓ Prove non distruttive sul calcestruzzo
- ✓ Analisi modale operativa (OMA)

Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

MONITORAGGIO MODEL BASED - Applicazione al PONTE DE LA BOTTE

Parametri rilevanti LOCALI - CAPACITÀ

Definizione della funzione di densità di probabilità della **resistenza dell'acciaio** e del **calcestruzzo** da letteratura e sulla base delle indagini.

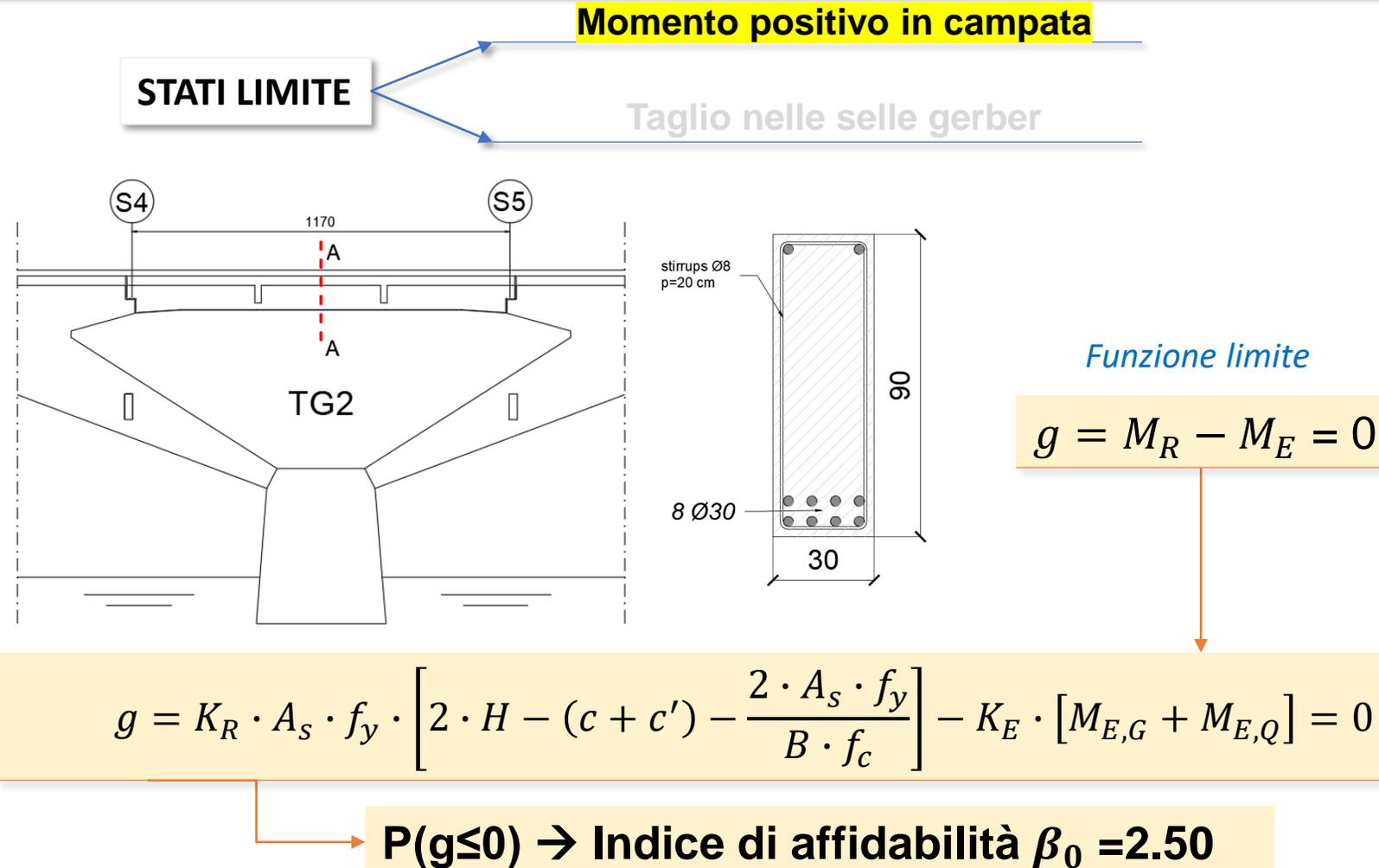
| | | Distribuzione | Valor medio | Deviazione Standard | References |
|-------|--|---------------|-------------|---------------------|--------------------------------------|
| f_y | Resistenza a snervamento | GAUSSIANA | 322.34 MPa | 26.59 MPa | <i>Verderame et al.</i> |
| f_c | Resistenza a compressione | LOG-NORMALE | 28.25 MPa | 5.39 MPa | <i>Silvestri, Gasparini et al.</i> |
| K_R | Incertezze di modellazione per la resistenza | LOG-NORMALE | 1.2 | 0.15 | <i>Probabilistic Modelcode. 2001</i> |

- ✓ Conoscenza preliminare, sviluppo di un modello preliminare di calcolo dell'opera e individuazione dei parametri rilevanti.
- ✓ Valutazione degli stati limite.
- ✓ Installazione del sistema di monitoraggio mirato alla valutazione dei parametri rilevanti.
- ✓ **Calibrazione dei parametri rilevanti e del modello agli elementi finiti** sulla base delle informazioni ricavate dal sistema di monitoraggio.
- ✓ Valutazione del livello di sicurezza e/o calcolo dell'indice di affidabilità.

Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

MONITORAGGIO MODEL BASED - Applicazione al PONTE DE LA BOTTE

- ✓ Conoscenza preliminare, sviluppo di un modello preliminare di calcolo dell'opera e individuazione dei parametri rilevanti.
- ✓ Valutazione degli stati limite.
- ✓ Installazione del sistema di monitoraggio mirato alla valutazione dei parametri rilevanti.
- ✓ Calibrazione dei parametri rilevanti e del modello agli elementi finiti sulla base delle informazioni ricavate dal sistema di monitoraggio.
- ✓ Valutazione del livello di sicurezza e/o calcolo dell'indice di affidabilità.



Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

MONITORAGGIO MODEL BASED - Applicazione al PONTE DE LA BOTTE

- ✓ Conoscenza preliminare, sviluppo di un modello preliminare di calcolo dell'opera e individuazione dei parametri rilevanti.
- ✓ Valutazione degli stati limite.
- ✓ Installazione del sistema di monitoraggio mirato alla valutazione dei parametri rilevanti.
- ✓ Calibrazione dei parametri rilevanti e del modello agli elementi finiti sulla base delle informazioni ricavate dal sistema di monitoraggio.
- ✓ Valutazione del livello di sicurezza e/o calcolo dell'indice di affidabilità.

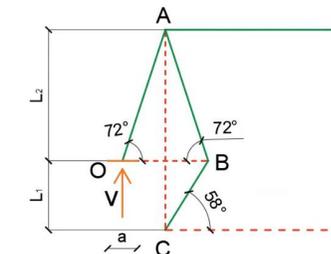
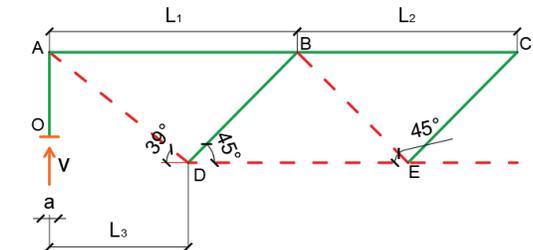
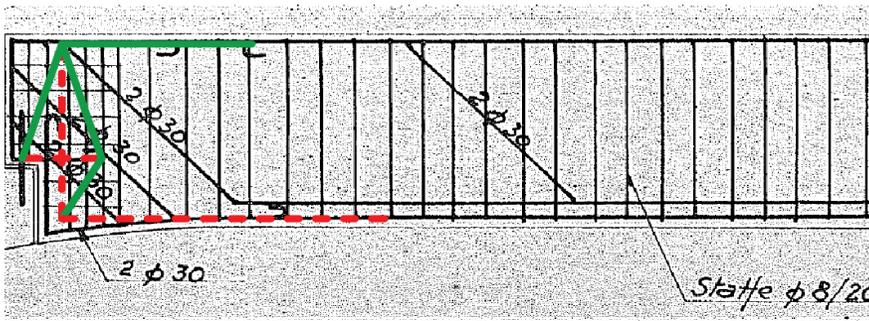
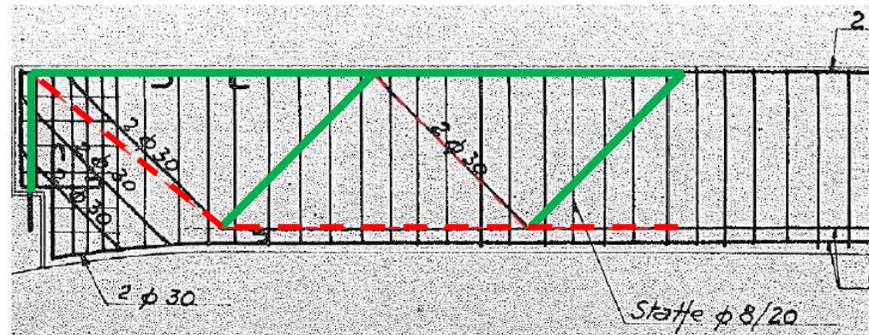
STATI LIMITE

Momento positivo in campata

Taglio nelle selle gerber

 **Puntoni**
 **Tiranti**

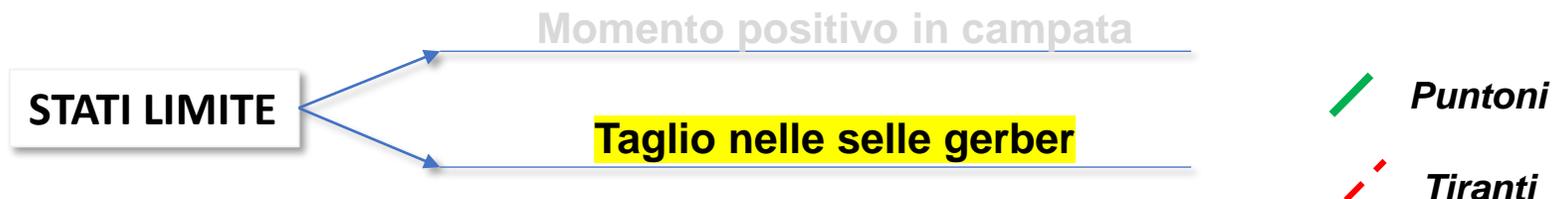
Possibili meccanismi resistenti:



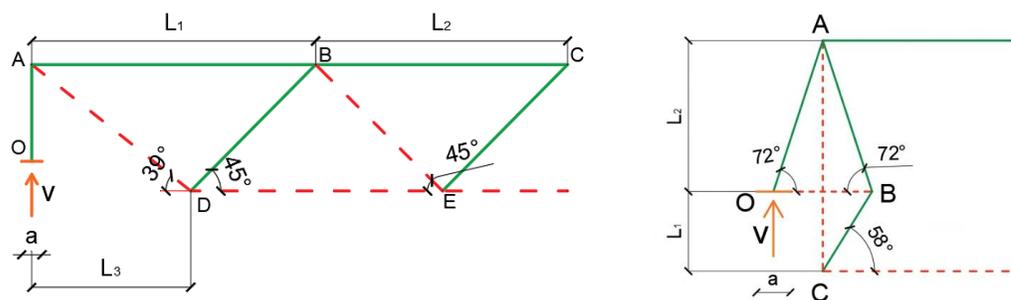
Conoscenza approfondita: valutazione del livello di sicurezza / affidabilità attuale

MONITORAGGIO MODEL BASED - Applicazione al PONTE DE LA BOTTE

- ✓ Conoscenza preliminare, sviluppo di un modello preliminare di calcolo dell'opera e individuazione dei parametri rilevanti.
- ✓ Valutazione degli stati limite.
- ✓ Installazione del sistema di monitoraggio mirato alla valutazione dei parametri rilevanti.
- ✓ Calibrazione dei parametri rilevanti e del modello agli elementi finiti sulla base delle informazioni ricavate dal sistema di monitoraggio.
- ✓ Valutazione del livello di sicurezza e/o calcolo dell'indice di affidabilità.



Possibili meccanismi resistenti:



Possibili ipotesi di redistribuzione del taglio:

- 1 I due meccanismi lavorano in parallelo. La capacità dei due meccanismi resistenti è pari alla somma delle capacità degli elementi più deboli dei due modelli. $P(g \leq 0) \rightarrow \beta = 1.80$
- 2 Ridistribuzione del taglio in modo eguale tra i due modelli resistenti. $P(g \leq 0) \rightarrow \beta = 2.32$

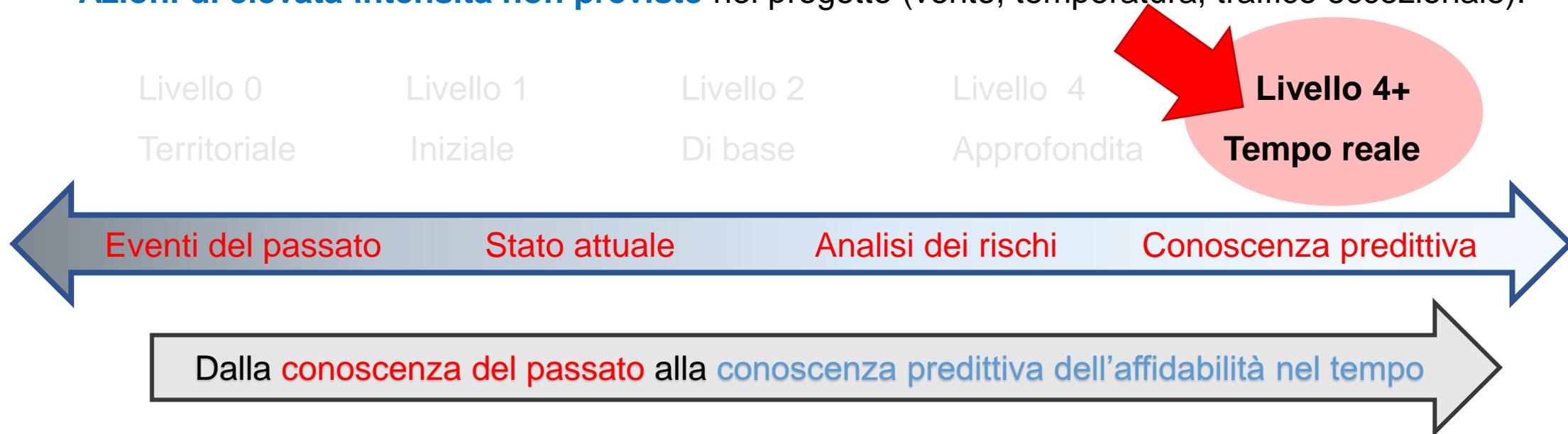
$$g(x, t) = K_r \cdot [\min(N_{rd,1}) + \min(N_{rd,2})] - K_e \cdot V = 0$$

L'importanza della conoscenza nel processo di gestione dei ponti esistenti

CONOSCENZA

Ai fini della progressiva piena conoscenza delle opere, occorre riconoscere, localizzare e quantificare:

- **Situazioni evolutive di danno e degrado** delle opere;
- **Rischi naturali interferenti** (frana, sisma, rischio idraulico);
- **Azioni di elevata intensità non previste** nel progetto (vento, temperatura, traffico eccezionale).



Conoscenza approfondita: valutazione dell'affidabilità in tempo reale

DALLA VALUTAZIONE DELLA TRANSITABILITA' ALLA PREVISIONE DELLA VITA UTILE

- **Conoscenza dal passato**

- Dal Livello 0, 1 e 2: ispezioni, classificazione, indagini, verifiche di sicurezza, monitoraggio
- Dal Livello 4: modello strutturale dell'opera, opportunamente calibrato

- **Stato attuale**

- Sviluppo di un modello probabilistico dell'opera, integrato nel tempo con i dati di monitoraggio e con inserimento di modelli di degrado dei materiali – utilizzo IA e analisi dati
- Monitoraggio e piani di indagini finalizzati alla riduzione delle incertezze, sia per la capacità dell'opera, che per la domanda

- **Conoscenza predittiva**

- Integrazione continua dei dati di monitoraggio per aggiornamento in tempo reale dell'affidabilità dell'opera e della vita residua – utilizzo IA per sviluppo di modelli predittivi anche su difetti occulti

Conoscenza approfondita: valutazione dell'affidabilità in tempo reale

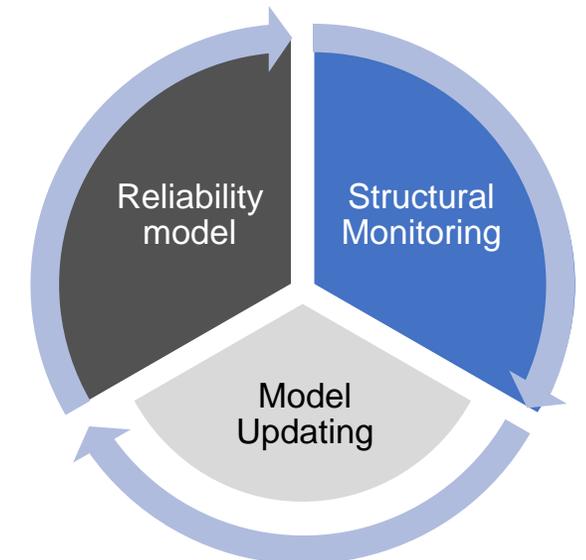
MONITORAGGIO PER SVILUPPO DI MODELLI ADATTIVI DI PREVISIONE DELLA VITA UTILE

OBIETTIVO

Valutazione del **livello di sicurezza dell'opera** e della **variazione dell'indice di affidabilità strutturale nel tempo** per ogni stato limite e stima della **vita residua**. Monitoraggio per riduzione delle incertezze.

METODOLOGIA:

- ✓ **Conoscenza preliminare, sviluppo di un modello di calcolo dell'opera**, e individuazione dei **parametri rilevanti**.
- ✓ Valutazione degli **stati limite**, caratterizzazione **probabilistica dei parametri rilevanti** e definizione dei **modelli di degrado** associati ai parametri rilevanti. **!**
- ✓ Installazione del sistema di monitoraggio mirato alla valutazione di **parametri rilevanti**.
- ✓ **Calibrazione di modelli di calcolo** sulla base delle **informazioni ricavate dal sistema di monitoraggio**.
- ✓ **Calcolo dell'indice di affidabilità nel tempo e della vita residua.** **!**
- ✓ **Aggiornamento continuo nel tempo per integrazione dati monitoraggio – modello.**



Conoscenza approfondita: valutazione dell'affidabilità in tempo reale

MONITORAGGIO PER SVILUPPO DI MODELLI ADATTIVI DI PREVISIONE DELLA VITA UTILE

OBIETTIVO

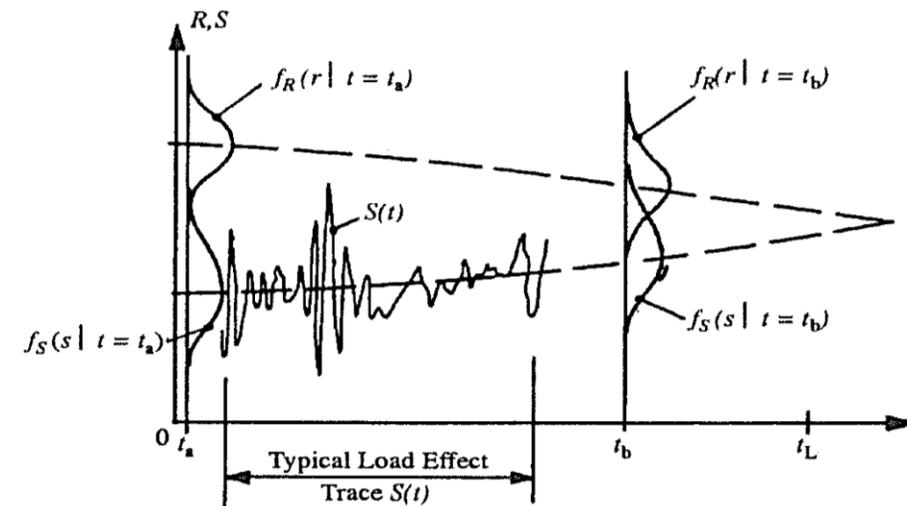
Valutazione del **livello di sicurezza dell'opera** e della **variazione dell'indice di affidabilità strutturale nel tempo** per ogni stato limite e stima della **vita residua**. Monitoraggio per riduzione delle incertezze.

Valutazione dell'indice di affidabilità nel tempo: $P(g_i(C(t), D(T_r)) < 0) \rightarrow \beta_i(t) \rightarrow P_f(t) \sim \Phi(-\beta_i(t))$

Nel tempo, **riduzione della capacità e aumento della domanda**



Maggiore probabilità di accadimento di evento di intensità elevata



Conoscenza approfondita: valutazione dell'affidabilità in tempo reale

MONITORAGGIO PER SVILUPPO DI MODELLI ADATTIVI DI PREVISIONE DELLA VITA UTILE

OBIETTIVO

Valutazione del **livello di sicurezza dell'opera** e della **variazione dell'indice di affidabilità strutturale nel tempo** per ogni stato limite e stima della **vita residua**. Monitoraggio per riduzione delle incertezze.

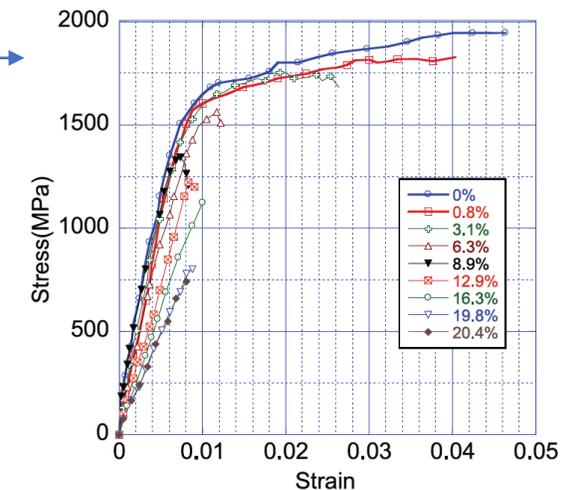
Introduzione dei modelli di degrado all'interno del modello probabilistico

Ad esempio, corrosione dei cavi per travi in precompresso con cavi post-tesi

Tipica per cavi in acciaio ad alta resistenza

- **Da cloruri**
- Da carbonatazione
- Infragilimento da idrogeno
- Corrosione sotto sforzo
- Corrosione da fatica

Riduzione della resistenza ultima e della duttilità



Zhao-Hui Lu et al: An Investigation of Degradation of Mechanical Behaviour of Prestressing Strands Subjected to Chloride Attacking

Conoscenza approfondita: valutazione dell'affidabilità in tempo reale

MONITORAGGIO PER SVILUPPO DI MODELLI ADATTIVI DI PREVISIONE DELLA VITA UTILE

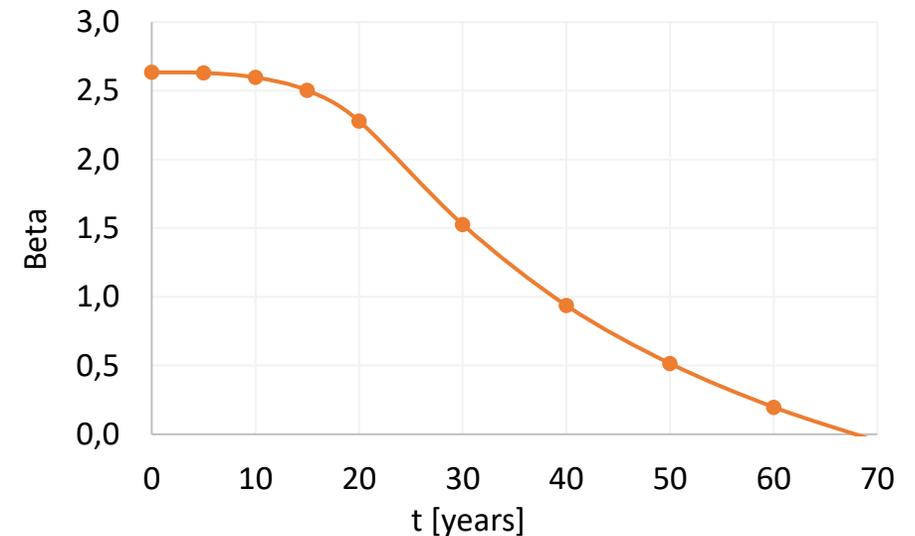
OBIETTIVO

Valutazione del **livello di sicurezza dell'opera** e della **variazione dell'indice di affidabilità strutturale nel tempo** per ogni stato limite e stima della **vita residua**. Monitoraggio per riduzione delle incertezze.

Modello probabilistico
della struttura
con **integrazione dei
modelli di degrado
al tempo 0**



Valutazione dell'indice
di affidabilità nel
tempo



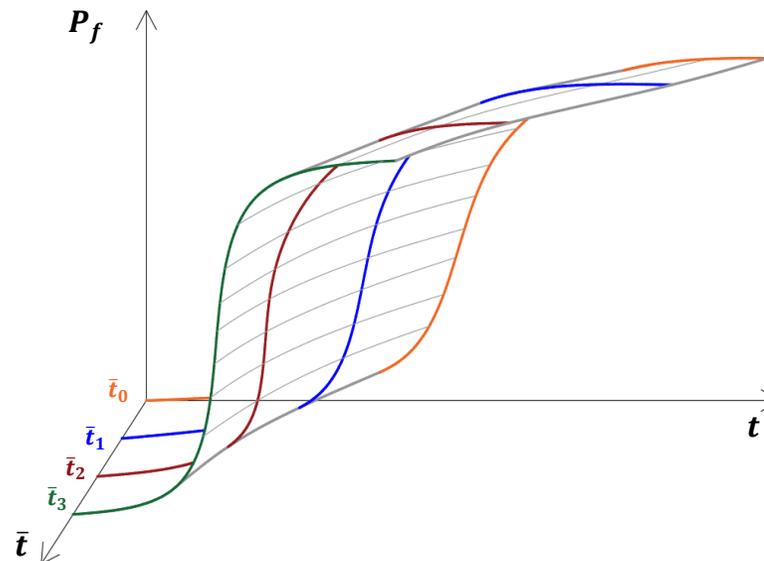
Conoscenza approfondita: valutazione dell'affidabilità in tempo reale

MONITORAGGIO PER SVILUPPO DI MODELLI ADATTIVI DI PREVISIONE DELLA VITA UTILE

OBIETTIVO

Valutazione del **livello di sicurezza dell'opera** e della **variazione dell'indice di affidabilità strutturale nel tempo** per ogni stato limite e stima della **vita residua**. Monitoraggio per riduzione delle incertezze.

Monitoraggio strutturale e **aggiornamento** dei modelli probabilistici dei parametri rilevanti



Aggiornamento della variazione della nel tempo della probabilità di fallimento e possibile valutazione della vita residua

Conoscenza approfondita: valutazione dell'affidabilità in tempo reale

Monitoraggio della singola opera nel suo contesto – *MONITORAGGIO REAL TIME RELIABILITY ANALYSIS*

OBIETTIVO

Valutazione del **livello di sicurezza dell'opera** e della **variazione dell'indice di affidabilità strutturale nel tempo** per ogni stato limite e stima della **vita residua**. Monitoraggio per riduzione delle incertezze.

Applicazione del metodo al PONTE DE LA BOTTE



A partire dal modello probabilistico definito precedentemente, si **integrano i modelli di degrado** del materiale e si valuta la **variazione dell'indice di affidabilità nel tempo**.

Conoscenza approfondita: valutazione dell'affidabilità in tempo reale

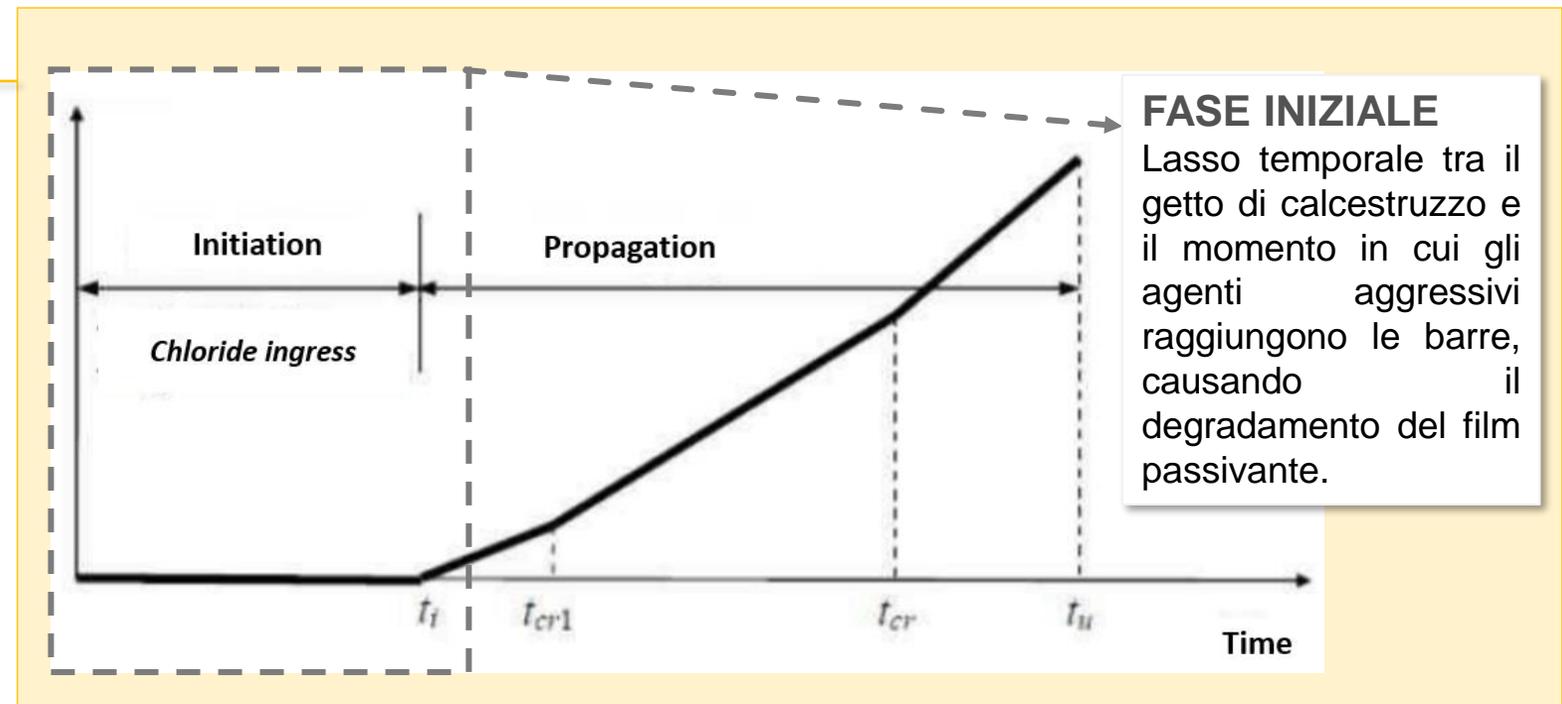
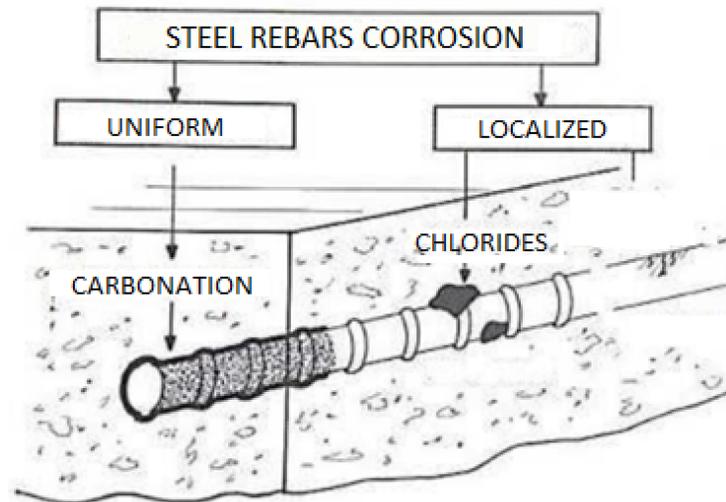
MONITORAGGIO REAL TIME RELIABILITY ANALYSIS - Applicazione al PONTE DE LA BOTTE

Fonte di degrado → riduzione dell'area delle barre
 $A_s(t)$ per effetto della corrosione



Processi di corrosione

- Indotta da cloruri
- Indotta dalla carbonatazione



Conoscenza approfondita: valutazione dell'affidabilità in tempo reale

MONITORAGGIO *REAL TIME RELIABILITY ANALYSIS* - Applicazione al **PONTE DE LA BOTTE**

Fonte di degrado → riduzione dell'area delle barre
 $A_s(t)$ per effetto della corrosione

FASE INIZIALE

La quantità di ioni di cloruro che inializza la corrosione dipende da:

- ❖ Miscela calcestruzzo
- ❖ Rapporto acqua/cemento
- ❖ Indurimento del calcestruzzo
- ❖ Umidità
- ❖ Tipologia di barre di acciaio e superficie
- ❖ Contenuto di ossigeno



c = copriferro

D = coefficiente di diffusione del calcestruzzo

C_{cr} = concentrazione critica dei cloruri

C_s = concentrazione di cloruri in superficie

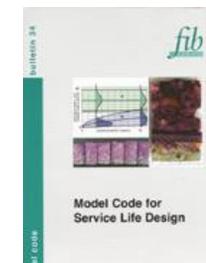


Nessuna informazione sulla composizione del calcestruzzo e sull'attuale coefficiente di diffusione!

$$D_{app,c}(t) = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t)$$

$$k_e = \exp\left(b_e \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}}\right)\right)$$

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a$$



fib 34

In corso
ulteriori
indagini

Conoscenza approfondita: valutazione dell'affidabilità in tempo reale

MONITORAGGIO *REAL TIME RELIABILITY ANALYSIS* - Applicazione al PONTE DE LA BOTTE

Fonte di degrado → riduzione dell'area delle barre
 $A_s(t)$ per effetto della corrosione



FASE DI PROPAGAZIONE

Sezione resistente della barra in acciaio al tempo t (Botte W. & Caspee R., 2018)

$$A_s(t) = A_s(t_p) \cdot F_{T_i}(t) + A_{s0} \cdot (1 - F_{T_i}(t)) \quad F_{T_i}(t) = \text{Cumulative density function } T_i$$

Sezione resistente all'anno t_p years di propagazione della corrosione

$$A_s(t_p) = A_{s0} - \alpha V_{corr} t_p \sqrt{n_r \pi A_{s0}} + \frac{n_r \pi}{4} \alpha^2 V_{corr}^2 t_p^2$$

Riduzione del diametro della barra

$$x(t) = V_{corr,a} \cdot ToW \cdot \alpha_p \cdot t_p$$

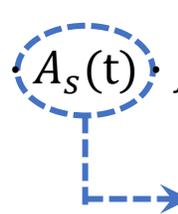
| | | Distribuzione | Valore medio | Deviazione Standard |
|--------------|--|---------------|--------------|---------------------|
| A_{s0} | Area iniziale delle barre [mm ²] | GAUSSIANA | Mean value | St.Deviation |
| α | Fattore di pitting | LOG-NORMALE | 9.28 | 4.04 |
| $V_{corr,a}$ | Velocità di corrosione [mm/y] | WEIBULL | 0.030 | 0.020 |
| ToW | Tempo di bagnato | NORMALE | 0.75 | 0.20 |

Conoscenza approfondita: valutazione dell'affidabilità in tempo reale

MONITORAGGIO REAL TIME RELIABILITY ANALYSIS - Applicazione al PONTE DE LA BOTTE

Aggiornamento delle funzioni limite considerando i modelli di degrado:
 applicazione allo stato limite momento positivo in campata della trave tampone

$$g = K_R \cdot A_s(t) \cdot f_y \cdot \left[2 \cdot H - (c + c') - \frac{2 \cdot A_s(t) \cdot f_y}{B \cdot f_c} \right] - K_E \cdot [M_{E,G} + M_{E,Q}] = 0$$


 Riduzione dell'area delle barre d'acciaio **nel tempo**

FASE INIZIALE

$$T_i = \frac{1}{4D} \frac{c^2}{\left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{cr}}{C_s} \right) \right]^2}$$

$$D_{app,c}(t) = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t)$$

$$k_e = \exp \left(b_e \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right) \quad A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a$$

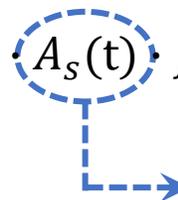
| | Distribuzione | Valor medio | Deviazione Standard |
|------------------------|----------------|-------------|---------------------|
| c [mm] | Deterministico | 30 | - |
| C _{cr} [%-mc] | Lognormale | 0.6 | 0.15 |
| C _s [%-mc] | Lognormale | 2 | 0.9 |

Conoscenza approfondita: valutazione dell'affidabilità in tempo reale

MONITORAGGIO *REAL TIME RELIABILITY ANALYSIS* - Applicazione al **PONTE DE LA BOTTE**

Aggiornamento delle funzioni limite considerando i modelli di degrado:
applicazione allo stato limite momento positivo in campata della trave tampone

$$g = K_R \cdot A_s(t) \cdot f_y \cdot \left[2 \cdot H - (c + c') - \frac{2 \cdot A_s(t) \cdot f_y}{B \cdot f_c} \right] - K_E \cdot [M_{E,G} + M_{E,Q}] = 0$$


 Riduzione dell'area delle barre d'acciaio **nel tempo**

FASE DI PROPAGAZIONE

Sezione resistente della barra in acciaio al tempo t (Botte W. & Caspeele R., 2018)

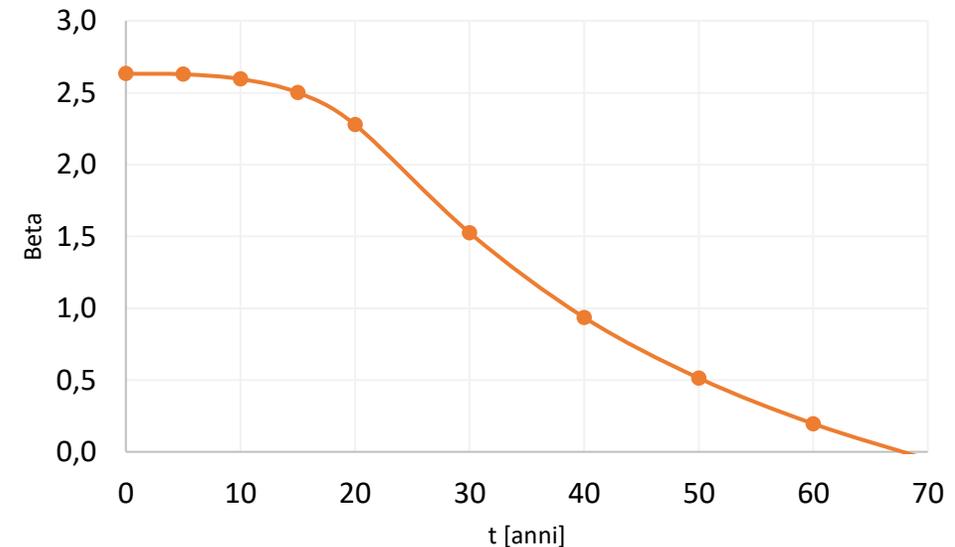
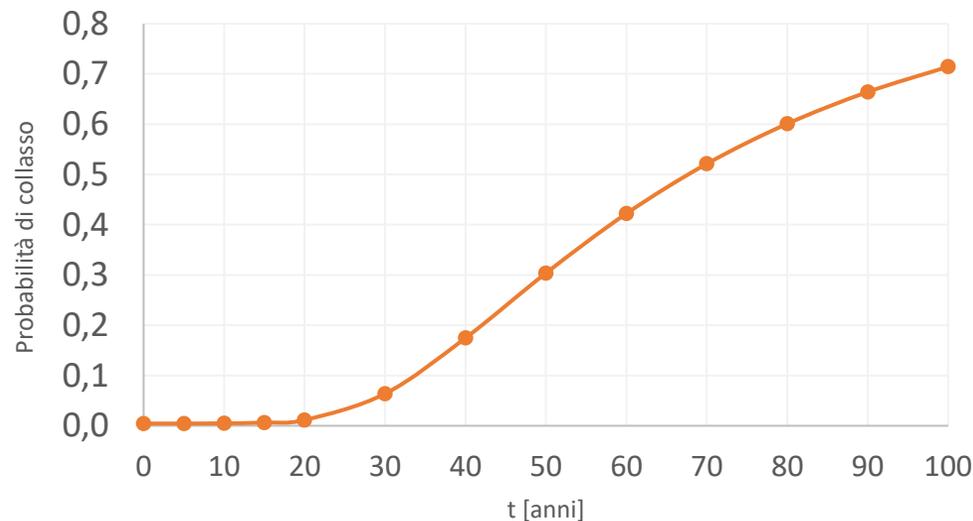
$$A_s(t) = A_s(t_p) \cdot F_{T_i}(t) + A_{s0} \cdot (1 - F_{T_i}(t)) \quad F_{T_i}(t) = \text{Funzione cumulata } T_i$$

Conoscenza approfondita: valutazione dell'affidabilità in tempo reale

MONITORAGGIO *REAL TIME RELIABILITY ANALYSIS* - Applicazione al **PONTE DE LA BOTTE**

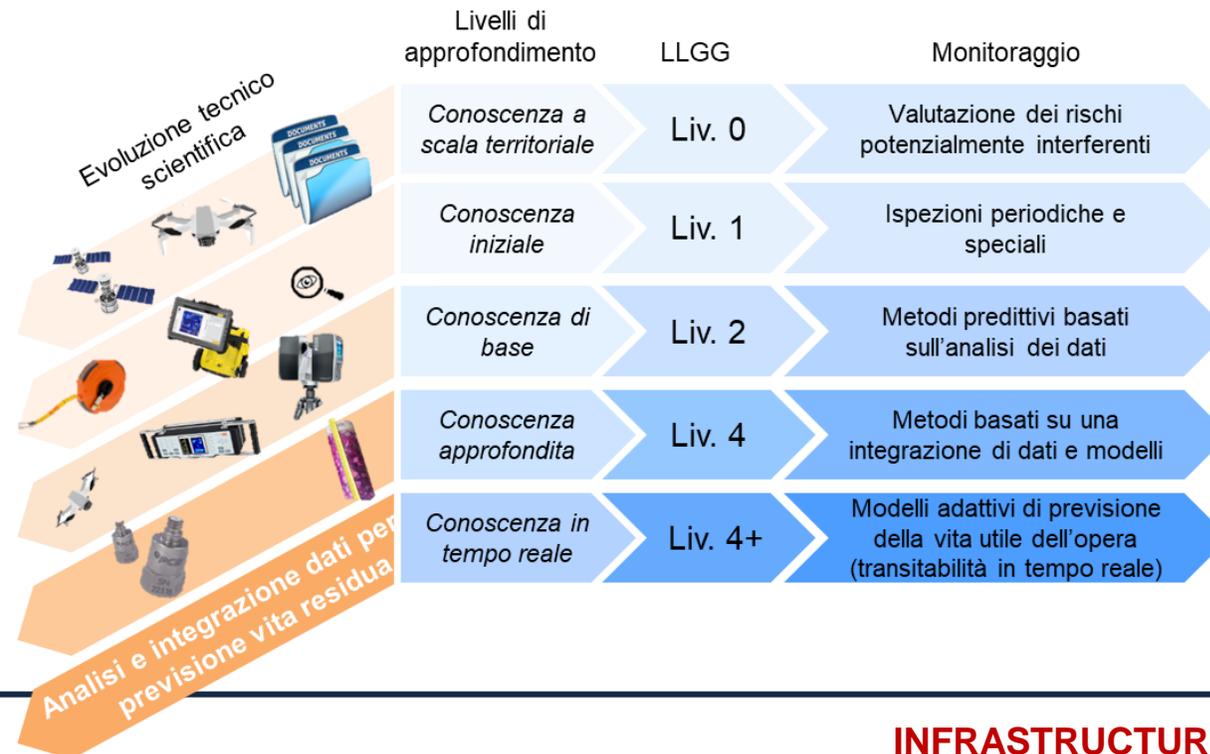
Valutazione della probabilità di collasso e dell'indice di affidabilità

Superata la fase di inizializzazione, la riduzione dell'area utile di acciaio a causa della corrosione da cloruri è rapida e la probabilità di collasso aumenta velocemente nel tempo, mentre l'affidabilità diminuisce



Una piattaforma per l'organizzazione e la gestione della conoscenza

- ✓ **Soluzione base della piattaforma** → Raccolta delle informazioni/dati da Livelli 0 e 1
→ Raccolta, rielaborazione, e visualizzazione dati dal Livello 2
- ✓ **Soluzioni successive** → Integrabile in caso di aggiunte o modifiche del sistema di monitoraggio di Livello 2
→ Modulare e sviluppabile in caso di sviluppo di sistemi di monitoraggio di livello successivo (Livelli 4 o 4+)



Conclusioni

La conoscenza deve essere calibrata e integrata con lo sviluppo tecnologico e non può prescindere dal suo aggiornamento nel tempo.

- Valutazione territoriale nel **tempo**
- Valutazione iniziale nel **tempo**
- Valutazione di base nel **tempo**
- Valutazione approfondita nel **tempo**
- Valutazione in **tempo reale**

Possibile grazie allo sviluppo tecnologico