

PROGRAMMA PRIN 2022 - BANDO PRIN 2022 Decreto Direttoriale n. 102 del 02-02-2022

TITOLO DEL PROGETTO: **FAIL-SAFE “near-real-time perFormance Assessment of exlsting buiLdings Subjected to initiAl Failure through multi-scale simulation and structural health monitoring” (2022JFXE95)**

CODICE CUP: E53D23003350006

Budget DIST: 76.443,00 €

P.I. Fulvio Parisi

Altre Unità di Ricerca coinvolte nel Progetto: Università degli Studi di Parma; Università degli Studi di Perugia

Descrizione del progetto

Il progetto FAIL-SAFE ha mirato a valutare in tempo quasi reale le prestazioni strutturali di edifici esistenti in calcestruzzo armato e in muratura, attraverso l'integrazione tra simulazione, monitoraggio strutturale e data science. Lo scopo del progetto era sviluppare una metodologia e modelli fisico-matematici che possano supportare il processo decisionale delle parti interessate allorquando si verifica un dissesto strutturale in un edificio, con particolare attenzione alla valutazione della sua sicurezza strutturale residua, del rischio degli edifici adiacenti e della resilienza dell'area urbana in cui l'edificio è ubicato. A partire da una raccolta di dati sulle tipologie strutturali e sugli scenari potenzialmente critici, il progetto si è focalizzato sulla definizione di alcuni archetipi edilizi e sullo sviluppo di modelli di fragilità tipologici. Successivamente, i dati prodotti da sistemi di monitoraggio strutturale sono stati impiegati per aggiornare i modelli suddetti e identificare il danno strutturale a fini previsionali. Lo sviluppo di modelli surrogati ha poi mirato ad estendere il monitoraggio a un numero maggiore di edifici, sino a raggiungere la scala urbana. La fase finale del progetto si è concentrata sulla valutazione della resilienza urbana al dissesto o al crollo di edifici, nonché sulla validazione della metodologia per alcuni casi studio di particolare rilevanza.

Risultati:

Le attività svolte nell'ambito del progetto FAIL-SAFE hanno raggiunto i principali obiettivi prefissati, sviluppando un quadro metodologico coerente e basato sulle prestazioni per supportare la valutazione degli edifici esistenti esposti a scenari di pericolo nei contesti urbani e per fornire risultati utili ai processi decisionali finalizzati alla mitigazione del rischio e al miglioramento della resilienza ai disastri.

Un risultato chiave del progetto è rappresentato dallo sviluppo di procedure di modellazione e valutazione applicabili a edifici esistenti caratterizzati da differenti sistemi strutturali, ossia edifici in muratura ed edifici con struttura intelaiata in calcestruzzo armato. In funzione del livello di conoscenza disponibile, è stata definita una differente strategia computazionale, che spazia da modelli semplificati bidimensionali a modelli tridimensionali non lineari accurati, da modelli numerici continui (FEM) a modelli discontinui (AEM), fino a modelli data-driven a supporto di aggiornamenti e inferenze rapide. In tale prospettiva, le unità di ricerca hanno sviluppato e analizzato modelli numerici e approcci complementari calibrati sulle tipologie edilizie e sugli obiettivi di analisi

considerati. Le procedure di modellazione hanno esplicitamente tenuto conto dell'interazione terreno-struttura mediante una schematizzazione semplificata ma fisicamente rappresentativa, che consente di cogliere l'influenza della deformabilità terreno-fondazione senza l'onere computazionale associato a modelli completamente accoppiati terreno-fondazione-struttura. Tale scelta di modellazione ha consentito di svolgere analisi di sensibilità sul ruolo della rigidità terreno/fondazione e di supportare confronti coerenti tra le diverse analisi, mantenendo al contempo l'impegno computazionale complessivo compatibile con le estese campagne parametriche sviluppate.

Il progetto ha inoltre incluso una definizione prestazionale degli stati limite strutturali e dei corrispondenti livelli di danno, identificando parametri di domanda ingegneristica e metriche di superamento specifiche per ciascun pericolo, sulla base di un'ampia investigazione numerica condotta sia su edifici in muratura, sia su edifici in calcestruzzo armato. Ciò ha fornito la base per una valutazione probabilistica delle prestazioni strutturali e della robustezza nei confronti dei cedimenti differenziali del terreno, portando allo sviluppo di nuove curve di fragilità tipologiche potenzialmente utilizzabili nell'ambito della valutazione del rischio. I modelli di fragilità proposti consentono di considerare il danno cumulato dovuto ad eventi concomitanti, tenendo conto anche del degrado dei materiali (ad esempio la corrosione delle armature nelle strutture in calcestruzzo armato). In questo contesto, un risultato particolarmente significativo è stato rappresentato dalla valutazione sismica di edifici interessati da danni indotti da cedimenti.

Un'altra attività fondamentale del progetto ha riguardato casi studio reali, che hanno consentito la validazione delle strategie computazionali rispetto a danni/collapsi osservati e dati di monitoraggio. La validazione è stata ulteriormente supportata da confronti incrociati tra previsioni "blind" ottenute mediante differenti strategie di modellazione e differenti software di calcolo, rafforzando così l'affidabilità delle procedure proposte per applicazioni su strutture reali e in contesti decisionali concreti.

Oltre alla scala del singolo edificio, il progetto si è caratterizzato anche per una prospettiva orientata alla resilienza urbana, inquadrando i risultati delle valutazioni in termini di funzionalità, recupero e prioritizzazione a scala territoriale, con l'obiettivo di supportare la pianificazione dell'emergenza e la risposta ai disastri in ambienti urbani.

Nel complesso, FAIL-SAFE fornisce un insieme scientificamente solido di metodi, strumenti e dataset in grado di supportare diversi stakeholder — quali agenzie di protezione civile, amministrazioni comunali, gestori di infrastrutture e patrimoni edilizi, professionisti dell'ingegneria e società di consulenza — nelle attività di screening rapido, prioritizzazione informata dal rischio e dalla resilienza, nonché nella definizione di strategie di mitigazione e gestione a seguito di un evento dannoso che colpisca un singolo edificio o un'area urbana.

Di seguito vengono elencati gli articoli pubblicati entro la data di ultimazione del progetto, ma vi sono alcuni manoscritti sottoposti a revisione, per cui tali elenchi potranno essere aggiornati.

Articoli pubblicati su rivista:

Canditone, C., Parisi, F., D'Ayala, D.F., Guardiola-Villora, A. (2025). "Seismic collapse analysis of unreinforced masonry buildings through applied element micro-modelling and crack width-based damage measures," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 23, 4719–4753. <https://doi.org/10.1007/s10518-025-02231-9>

da Rosa Ribeiro, L., Macedo, F.C., Beck, A.T., Parisi, F. (2025). "Optimal risk-based design of planar RC frames under progressive collapse: Influence of frame aspect ratio and column cross-section," *Engineering Structures*, 342, 120905. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120905>

da Rosa Ribeiro, L., da Silva, L.A.R., Beck, A.T., Parisi, F. (2025). "Risk-based compromise solutions between beam and column bending capacities for progressive collapse mitigation in

reinforced concrete frames,” *Journal of Building Engineering*, 112, 113713. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113713>

Farneti, E., Ávila, F., Cavalagli, N., Ubertini, F. (2024). “Collapse analysis of a masonry arch bridge using the applied element method,” *Engineering Research Express*, 6(3), 035109. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad6ad8>

Ierimonti, L., Mariani, F., Ubertini, F., Venanzi, I. (2026). “A dynamic Bayesian networks-based approach for data fusion of model-based SHM and visual inspections in post-tensioned bridges,” *Structures*, 86, 111389. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2026.111389>

Mariani, F., Ierimonti, L., Ubertini, F., Venanzi, I. (2026). “A comprehensive approach for model-based SHM of bridges using Bayesian neural networks,” *Structure and Infrastructure Engineering*, published online. <https://doi.org/10.1080/15732479.2026.2626406>

Mesbahi, P., García-Macías, E., Breccolotti, M., Ubertini, F. (2024). “Post-earthquake rapid seismic demand estimation at unmonitored locations via Bayesian networks,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22, 5705–5744. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01979-w>

Moreira, E., Paulo, R., Breccolotti, M., Cavalagli, N., Ubertini, F. (2025). “Integrating Structural Health Monitoring, HBIM, and Finite Element Simulation for Anomaly Detection: Towards a Digital Twin for Multi-Leaf Masonry Medieval Walls,” SSRN preprint. Available at SSRN.

Articoli pubblicati in atti di convegno:

Ávila, F., García-Macías, E., Cavalagli, N., Breccolotti, M., Ubertini, F., “Machine learning for detecting foundation settlements in historic masonry buildings using heterogeneous monitoring data,” SAHC 2025 conference paper.

Ávila, F., Farneti, E., Cavalagli, N., Ubertini, F., “Seismic Analysis of Historic Masonry Structures Using the Applied Element Method: The Case of Consoli Palace in Gubbio, Italy,” in N. Augenti, F. Parisi (eds.), *Atti IF CRASC '25 – VI Convegno di Ingegneria Forense e IX Convegno su Crolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento, Doppiavoce*, Napoli, 2025.

Buonocunto, V., Parisi, F., “Mitigazione del rischio sismico di edifici storici in muratura in Campania: confronto tra sistemi di rinforzo,” in N. Augenti, F. Parisi (eds.), *Atti IF CRASC '25 – VI Convegno di Ingegneria Forense e IX Convegno su Crolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento, Doppiavoce*, Napoli, 2025.

Buonocunto, V., Parisi, F., “Proposal of a taxonomy for regional seismic risk assessment of Italian masonry buildings,” *Procedia Structural Integrity*, 78, 169–176, 2026.

Canditone, C., Ierimonti, L., García-Macías, E., Ubertini, F., Parisi, F., “A multi-model strategy for model-based SHM of cultural heritage structures,” XX ANIDIS Conference, *Procedia Structural Integrity*, in press.

Canditone, C., Parisi, F., “Applied Element Analysis of Intact and Deteriorated Masonry Structures Subjected to Soil Settlements,” in F. M. Mazzolani et al. (eds.), *PROHITECH 2025, LNCE 596*, pp. 184–191, 2025.

Canditone, C., Parisi, F., “Structural Response Analysis of URM Buildings Subjected to Soil Settlements Via Discontinuum Modelling Techniques,” in G. Milani et al. (eds.), *ISCSES 2025, LNCE 746*, pp. 165–177, 2025.

Canditone, C., Parisi, F., Cavalagli, N., Ubertini, F., “Discontinuous analysis of heritage masonry structures subjected to soil settlements accounting for pre-existing seismic damage,” XX ANIDIS Conference, *Procedia Structural Integrity*, in press.

Farneti, E., Cavalagli, N., Ubertini, F., “A Numerical Strategy for the Collapse Analysis of Masonry Bridges Applied to the Prestwood Case Study,” conference paper.

Farneti, E., Cavalagli, N., Giardina, G., Macchiarulo, V., Milillo, P., Ubertini, F., “Structural Health Monitoring of Typical Urban Bridges in the Netherlands Combining Collapse Simulations and Monitoring Data,” *Procedia Structural Integrity*, 62, 438–445, 2024.

García-Macías, E., Tomassini, E., Hernández-González, I. A., Venanzi, I., Ubertini, F., “Automated Software Tools to Close the Gap in the Technology Transfer of SHM,” *WCEE 2024* paper.

Ierimonti, L., Ávila, F., García-Macías, E., Venanzi, I., Cavalagli, N., Ubertini, F., “Multi-hazard fragility assessment of cultural heritage structures using Bayesian networks,” *SAHC 2025* conference paper.

Mariani, F., Ierimonti, L., Ubertini, F., Venanzi, I., “A Bayesian Neural Network Approach for Probabilistic-Based Damage Detection of Monitored Bridges,” in A. Cunha, E. Caetano (eds.), *EVACES 2025*, LNCE 674, pp. 501–510, 2025.

Mariani, F., Ierimonti, L., Ubertini, F., Venanzi, I., “Probabilistic Damage Detection in a Post-Tensioned Concrete Bridge Using Bayesian Neural Networks for Continuous Model Updating: a Numerical Study,” *IOMAC 2025* conference paper.

Michelini, E., Dudziak, S., Ravasini, S., Belletti, B., “Capacity assessment of corroded reinforced concrete frames subjected to differential ground settlements,” in *Proceedings of the fibCACRCS 2025*, Politecnico di Milano, Polo Territoriale di Lecco, Lecco, Italy, 30 June–3 July 2025.

Michelini, E., Dudziak, S., Ravasini, S., Belletti, B., “NLFEA Damage Assessment of RC Framed Buildings Subjected to Column Settlements,” *Procedia Structural Integrity*, 64, 1967–1974, 2024.

Michelini, E., Pappalardo, M., Belletti, B., Ravasini, S., Dudziak, S., “Assessment of an Existing RC Frame Subjected to Differential Settlements using Nonlinear Finite Element Analysis,” in *Proceedings of the 2025 fib International Symposium*, Antibes, France, 16–18 June 2025.

Michelini, E., Pappalardo, M., Belletti, B., Ravasini, S., Dudziak, S., “Numerical study on settlement-induced damage to RC frames: the effect of foundation and ground stiffness,” in *Proceedings of the 2025 fib International Symposium*, Antibes, France, 16–18 June 2025.

Michelini, E., Ravasini, S., Pappalardo, M., Belletti, B., “Numerical Prediction of the Structural Response of Corroded Existing RC Frames Exposed to Differential Settlements,” in N. Augenti, F. Parisi (eds.), *Atti IF CRASC '25 – VI Convegno di Ingegneria Forense e IX Convegno su Crolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento, Doppiavoce*, Napoli, 2025.

Moreira, E., Breccolotti, M., Paulo, R., Cavalagli, N., Ubertini, F., “Digital Approach to Heritage Conservation: First Steps for the Digital Twin of Gubbio’s Medieval Wall,” in S. Saloustros, K. Beyer (eds.), *Structural Analysis of Historical Constructions*. *SAHC 2025*. *RILEM Bookseries*, vol. 68, Springer, Cham, 2026, pp. 455–468.

Moreira, E., Breccolotti, M., Cavalagli, N., Ubertini, F., “Structural Monitoring of Heritage Walls: Insights from the Medieval Walls of Gubbio Using Time-Series Decomposition,” in *Architecture, Engineering and Design for Monuments Safeguarding*, 2026.

Moreira, E., Paulo, R., Breccolotti, M., Cavalagli, N., Ubertini, F., “From baseline monitoring to seismic vulnerability assessment: Integrated thermal-mechanical analysis of Gubbio’s medieval wall,” *Procedia Structural Integrity*, 78, 1967–1974, 2026.

Rauseo, F., De Falco, M., Santo, A., Parisi, F., “Forensic analysis of a RC building collapsed during the 1998 Sarno Landslides,” in *IABSE Congress Ghent 2025 – The Essence of Structural Engineering for Society*, Ghent, 2025.

Rauseo, F., Parisi, F., "Forensic and Progressive Collapse Analysis of a RC Building Impacted by the 1998 Sarno Landslides," in N. Augenti, F. Parisi (eds.), Atti IF CRASC '25 – VI Convegno di Ingegneria Forense e IX Convegno su Crolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento, Doppiavoce, Napoli, 2025.

Rauseo, F., Parisi, F., "Structural Response of RC Framed Buildings to Differential Soil Settlements," in Proceedings of the fib Symposium 2025, Antibes, France, 16–18 June 2025.

Rauseo, F., Parisi, F., Pappalardo, M., Michelini, E., Belletti, B., "Effect of rebar corrosion and soil settlements on seismic capacity of RC framed buildings," XX ANIDIS Conference, Procedia Structural Integrity, in press.

Tomassini, E., Hernández-González, I. A., Giglioni, V., Venanzi, I., García-Macías, E., Ubertini, F., "Damage Detection in Two Small-Scale Steel Frames Through Transfer Learning," WCEE 2024 pape