

PROGRAMMA PRIN PNRR 2022 - BANDO PRIN PNRR 2022 Decreto Direttoriale n. 1409
n. 1409 del 14-9-2022

TITOLO DEL PROGETTO: SaFeBIMAs: Estimation of the combined Seismic-Fire risk and optimization of interventions for Buildings and Infrastructures in the context of Metropolitan Areas - P2022NCY5B

CODICE CUP: E53D23017360001

Budget DIST: 95.963,00

PI: Prof. Emidio Nigro

Altre Unità di Ricerca coinvolte nel progetto: UNISALENTO, UNIPA

Descrizione del progetto

La salvaguardia delle strutture e delle infrastrutture esistenti, esposte a diversi tipi di rischio, è il principale asse delle attuali politiche territoriali di sviluppo

sostenibile, secondo gli obiettivi nazionali dell'Agenda 2030 e del programma PNRR. La stima del rischio combinato sisma-incendio e l'ottimizzazione degli interventi per le strutture e le infrastrutture è

un tema critico di grande attualità. La valutazione della sicurezza sismica delle strutture/infrastrutture esistenti è comunemente effettuata considerando solo l'azione sismica, generalmente applicata ad

un modello analitico, trascurando lo stato tenso-deformativo indotto da fenomeni precedenti o senza considerare l'effetto dovuto ad altri hazard, naturali o antropici, come un incendio indotto dal terremoto (cascading effects) oppure innescato da una causa non correlata all'evento sismico. In entrambi i casi la vulnerabilità della struttura all'incendio è fortemente influenzata dal livello di danno esistente.

Le attività del progetto sono state svolte grazie alla collaborazione tra tre unità di ricerca: one nel Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università degli Studi di Napoli 'Federico II', coordinata dal Prof. Emidio Nigro, una nel Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Palermo, guidata dal Prof. Piero Colajanni, e una presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università degli Studi del Salento, coordinata dal Prof. Daniele Perrone.

Principali risultati ottenuti:

1. **Metodologia per la Valutazione della Fragilità di Strutture a Rischi Multipli.** È stata definita una metodologia innovativa per derivare le curve di fragilità per strutture esposte a incendio dopo aver subito un danno sismico di livello basso o moderato. L'approccio combina metodi esistenti per la fragilità sismica con nuovi concetti prestazionali propri dell'ingegneria antincendio. Utilizza il metodo della "Cloud Analysis", in cui il Rapporto Domanda-Capacità (DCR) per un dato livello di prestazione è correlato a una Misura di Intensità (IM) dell'incendio attraverso una regressione lineare logaritmica. Ciò consente di creare curve di fragilità che quantificano la probabilità di superare un determinato stato di danno. La

metodologia è stata validata su una pila da ponte rappresentativa in cemento armato (c.a.), testando diverse Misure di Intensità come il picco di rilascio termico (HRR) e il carico d'incendio totale (Q) per trovare la migliore correlazione con la risposta strutturale.

2. **Integrazione e Potenziamento di Strumenti Numerici.** Per creare una piattaforma unificata per l'analisi multi-rischio, è stato condotto uno studio comparativo approfondito tra SAFIR (un software specializzato in ingegneria antincendio) e OpenSees (un software open-source di analisi sismica molto utilizzato nella comunità scientifica). Un contributo significativo è stato lo sviluppo e la validazione di un modulo termo-meccanico avanzato per OpenSees, che incorpora un nuovo metodo di interpolazione 2D basato sulla triangolazione di Delaunay. Questo risolve una limitazione chiave del software originale, consentendo la modellazione accurata di campi di temperatura non uniformi su sezioni trasversali a fibre, un aspetto critico per simulare realisticamente i carichi termici indotti dall'incendio. Il nuovo modulo è stato validato attraverso una serie di benchmark rispetto a SAFIR, dimostrando un'eccellente concordanza nella previsione di spostamenti, ridistribuzione delle forze interne e degrado meccanico.
3. **Analisi Strutturale Avanzata ed Effetti dello Spalling.** È stata eseguita un'analisi di sensibilità sul modello di pila da ponte in c.a. per quantificare l'impatto dello "spalling" del calcestruzzo, ovvero l'espulsione esplosiva del copriferro ad alte temperature, sulla risposta strutturale. Simulando uno scenario peggiore con la completa assenza del copriferro, l'analisi ha mostrato che lo spalling è un fattore decisivo nella vulnerabilità al fuoco. La perdita del copriferro espone direttamente l'armatura al calore, accelerandone il degrado e causando un drastico aumento dello spostamento laterale e del rapporto domanda-capacità.
4. **Analisi Costi-Benefici per l'Adeguamento Strutturale.** È stata sviluppata una metodologia per la progettazione di interventi di adeguamento antincendio basata su un'analisi costi-benefici sul ciclo di vita e guidata dalla fragilità. Questo framework supporta un processo decisionale ottimizzato per selezionare le strategie di protezione passiva al fuoco più efficaci, bilanciando prestazioni tecniche e sostenibilità economica.
5. **Classificazione del Pericolo di Incendio per i Ponti.** Il metodo di analisi del rischio incendio proposto da Kodur & Nasser è stato applicato a un campione di 30 ponti sulla circonvallazione di Palermo. Avendo riscontrato che il 70% delle strutture rientrava in una categoria ad alto rischio, il metodo è stato adattato e riponderato per le infrastrutture italiane. Ciò ha portato a un nuovo sistema di classificazione del pericolo a cinque classi, compatibile con le Linee Guida Italiane sui Ponti Esistenti, consentendo una più efficace prioritizzazione delle attività di riduzione del rischio.
6. **Impatto dell'Invecchiamento e della Corrosione.** La ricerca ha studiato approfonditamente l'effetto del degrado ambientale sulle prestazioni strutturali. È stato implementato un modello semplificato per stimare la riduzione del dominio di interazione momento-sforzo assiale di pilastri in c.a. soggetti a corrosione, tenendo conto dell'espulsione del copriferro, dell'instabilità delle armature longitudinali e della perdita di aderenza. Ciò ha permesso una valutazione più accurata delle strutture con un danno preesistente.
7. **Vulnerabilità Sismica di Ponti Danneggiati.** Sono state sviluppate metodologie per derivare curve di fragilità sismica per ponti in vari stati: integri, deteriorati dall'invecchiamento, danneggiati da incendio e con scenari combinati di invecchiamento e incendio. I risultati hanno mostrato che, mentre le pile a telaio presentavano modesti aumenti di vulnerabilità, il rischio diventava critico quando

un'elevata corrosione delle staffe portava a meccanismi di rottura fragile a taglio. Si è anche scoperto che le sezioni rettangolari e quadrate cave sono significativamente più vulnerabili agli effetti combinati rispetto alle sezioni circolari piene.

8. **Efficacia degli Interventi di Rinforzo e Sviluppo di Strumenti di Valutazione.** È stata valutata l'efficacia di tecniche di rinforzo, come la precompressione esterna e le incamiciature in calcestruzzo ad alte prestazioni, nel migliorare il comportamento in condizioni di incendio. Inoltre, è stato creato uno strumento per automatizzare le analisi parametriche necessarie a generare curve di fragilità sismica per ponti con diversi gradi di danno da corrosione e incendio.
9. **Tassonomia degli Edifici e Ispezione Visiva Rapida (RVS).** È stata sviluppata una tassonomia completa degli edifici per la valutazione del rischio multi-rischio, attingendo a database italiani come Da.D.O. e CARTIS per creare un profilo statistico del patrimonio edilizio nazionale. Sulla base di ciò, è stata creata una nuova scheda di rilievo RVS per calcolare un unico indice di rischio sismico-incendio unificato. La metodologia è stata applicata e calibrata con successo su campioni di edifici colpiti da passati terremoti italiani (es. L'Aquila 2009, Emilia 2012), producendo mappe di rischio.
10. **Vulnerabilità Latente di Edifici Danneggiati da Incendio.** È stata sviluppata una metodologia multifase per valutare la vulnerabilità sismica nascosta di edifici in c.a. che sono stati precedentemente esposti a un danno da incendio moderato e non visivamente evidente. La procedura integra l'analisi termica (utilizzando Ozone e SAFIR) per quantificare il degrado dei materiali con l'analisi statica non lineare (pushover) per valutare il comportamento sismico post-incendio.
11. **Alterazione dei Meccanismi di Collasso.** Una scoperta cruciale derivata da questa metodologia è che, mentre incendi localizzati possono avere un impatto trascurabile su una struttura ridondante, un danno da incendio diffuso (ad esempio, che interessa il 50% dei pilastri al piano terra) può causare una riduzione significativa della capacità sismica (10-13% del taglio alla base) e, aspetto critico, alterare il meccanismo di collasso globale, passando da un collasso di un piano intermedio a un più pericoloso meccanismo di piano debole (soft-story) al piano terra. Ciò evidenzia un pericolo nascosto che potrebbe essere trascurato nelle valutazioni post-incendio standard.