

**Borsa di studio attivata ai sensi di quanto disposto dal D.M. n. 1061 del 10/08/2021**

Titolo del progetto: Applicazione di materiali innovativi nelle tecniche di rinforzo strutturale ed efficientamento energetico degli edifici

La borsa sarà attivata sul seguente corso di dottorato accreditato per il XXXVII ciclo:  
ENGINEERING AND APPLIED SCIENCE FOR ENERGY AND INDUSTRY

Responsabile scientifico: Annamaria Pau

Area per la quale si presenta la richiesta: GREEN

Numero di mensilità da svolgere in azienda: 6

Numero di mensilità da svolgere all'estero: 6 presso Wroclaw University of Technology

Azienda: No.Do. e Servizi S.r.l., via Genova 8, Rende CS

Progetto di ricerca:

Uno degli aspetti più rilevanti nel rinforzo e ripristino del patrimonio edilizio esistente consiste nella necessità di realizzare i lavori necessari minimizzando tempi e costi, intesi sia come costi propri delle opere, che come ammontare legato a variabili accessorie, tra cui, in particolare, la necessità dell'allontanamento temporaneo degli utilizzatori dai fabbricati. E' di primaria importanza la definizione di tecniche di programmazione ed esecuzione dei lavori che riducano al minimo i disagi per gli utilizzatori e forniscano il migliore risultato possibile dal punto di vista strutturale. Tali tecniche dovranno essere applicabili sia ai materiali tradizionali sia ai materiali innovativi, il cui vantaggio è la velocità di applicazione a fronte tuttavia di un processo di preparazione degli elementi sui quali dovranno essere applicati, che può risultare anche lungo e complesso. Grande attenzione va posta nel caso di strutture storiche, costituite in gran parte da costruzioni in muratura portante. In tal caso, gli interventi dovranno essere tali da non snaturare il materiale costitutivo ed essere rimovibili e integrabili.

Gli interventi che mirano al miglioramento del comportamento strutturale in maniera spinta comportano una alterazione del comportamento originario tanto maggiore quanto più elevato è il grado di sicurezza teorico raggiunto. In questo caso, lo stato tensionale subisce notevoli alterazioni, al pari della risposta dinamica, come conseguenza del tentativo di dare alle strutture una configurazione più simile a quella di una struttura progettata e realizzata secondo le normative attualmente in vigore.

Scopo del progetto di ricerca è lo studio e l'applicazione di tecniche di ripristino e rinforzo strutturale, con efficacia sia in ambito statico che dinamico, tali da consentire di sfruttare al meglio possibile la resistenza residua delle strutture esistenti, nel rispetto delle condizioni di equilibrio consolidate nel corso degli anni ed in relazione alla loro storia di danno e/o di degrado.

Danno e degrado strutturale possono aver interessato una struttura lasciando segni sia in termini di capacità di resistenza residua che in termini di capacità deformative, evidenze che occorre considerare in fase di realizzazione degli interventi di ripristino e rinforzo.

Verranno indagate le attuali tecniche che utilizzano materiali tradizionali e innovativi, al fine di stabilire dei protocolli di intervento sulle strutture esistenti e al fine di migliorare il comportamento strutturale e ridurre, nel contempo, i tempi necessari all'esecuzione degli interventi.

Particolare attenzione andrà posta nell'individuazione di soluzioni integrate nell'ottica del risparmio energetico. La ricerca dei materiali adatti dal punto di vista strutturale dovrà andare di pari passo ed essere compatibile con interventi volti al contenimento dei consumi energetici. Le soluzioni impiantistiche dovranno essere studiate impostando come funzione obiettivo il contenimento dei consumi, unitamente al pieno comfort ambientale.

Dal punto di vista tecnico, ciò richiederà analisi termo-igrometriche delle stratigrafie come previsto dalle norme vigenti, al fine di assicurare le migliori condizioni di qualità dell'aria. A tal proposito, verranno considerati sistemi di ventilazione meccanica controllata che garantiscono il ricambio d'aria, con il vantaggio di recuperare parte del contenuto entalpico attraverso scambiatori, evitando di disperderlo attraverso le finestre e minimizzando il carico sui sistemi di condizionamento. Tutte le analisi saranno condotte implementando un modello numerico di ottimizzazione, il quale verrà alimentato con dati sperimentali forniti da sensori di misura delle variabili di interesse, quali sonde di temperatura e umidità.

Il programma di studio si sviluppa nelle seguenti fasi.

Fasi strutturali.

1. Analisi delle metodologie e dei materiali attualmente impiegati nel ripristino e rinforzo strutturale, con comparazione di tempi e costi.
2. Indagine sull'efficacia di tali metodologie attraverso l'osservazione dei loro effetti sulla risposta statica e dinamica delle strutture, attraverso l'elaborazione di modelli e l'esecuzione di prove in laboratorio e in situ.
3. Definizione di metodologie di esecuzione per gli interventi strutturali, anche removibili, che siano efficaci e che minimizzino i tempi di lavorazione.
4. Applicazione di materiali innovativi nell'ottica del rispetto del comportamento consolidato delle strutture in esame.
5. Valutazione dell'efficacia delle nuove tecnologie e materiali proposti in rapporto alle metodologie tradizionali.

Fasi energetiche.

1. Installazione della sensoristica necessaria per il monitoraggio in continuo dei principali parametri per il mantenimento delle condizioni termo-igrometriche di comfort interne.
2. Creazione di un modello che permetta di simulare il sistema energetico dell'edificio ed effettuare delle analisi dinamiche con frequenza oraria.
3. Applicazione e calibrazione del modello su un caso di studio reale.

Dal punto di vista strutturale occorrerà procedere ad una accurata analisi dello stato attuale, provvedendo alla caratterizzazione geometrica e meccanica del fabbricato e dei materiali costituenti attraverso indagini visive e prove su campioni estratti, privilegiando la sostituzione delle prove classiche semi-distruttive e distruttive con prove non-distruttive, come previsto anche nelle normative vigenti.

Parallelamente occorrerà procedere ad una due diligence documentale al fine di acquisire la maggiore quantità di informazioni possibili, al fine di ridurre le incertezze a potere adottare un fattore di confidenza meno penalizzante possibile.

Il programma di studio sarà articolato come segue, considerando fasi distinte dedicate all'analisi dello stato attuale, all'analisi teorico-sperimentale delle metodologie di intervento, allo studio di applicazioni innovative per la soluzione delle problematiche strutturali ed ambientali, per arrivare in conclusione alla fase di progettazione e realizzazione di un intervento completo.

1. Primo anno.

1.1. Studio dei materiali e individuazione dei modelli costitutivi più aderenti al problema in esame. Ciò risulta particolarmente importante soprattutto nel caso in cui si abbiano materiali a spiccato comportamento non lineare, al fine di prevedere il comportamento strutturale teorico.

1.2. Modellazione della struttura ed analisi statiche e dinamiche.

1.3. Indagini complessive sul comportamento strutturale, stima dell'efficacia della modellazione nel descrivere i fenomeni deformativi e di danno.

1.4. Esecuzione di prove in situ, ad es. prove dinamiche con vibrodine o prove di rumore ambientale, per la caratterizzazione della risposta dinamica della struttura reale.

1.5. Esecuzione di simulazioni numeriche che forniscano una determinazione attendibile della prestazione energetica del fabbricato.

1.6. Realizzazione dell'infrastruttura hardware e della sensoristica necessaria per le analisi termo-igrometriche puntuali all'interno dei locali interessati, con acquisizione dei dati al fine di creare un archivio per l'elaborazione dati e l'ottimizzazione dei modelli.

## 2. Secondo anno

2.1. Studio di metodi e materiali per il rinforzo-risanamento strutturale che permettano di ottenere un miglioramento del comportamento statico e dinamico.

2.2. Individuazione di modelli numerici per la simulazione del comportamento dei materiali strutturali.

2.3. Analisi dei metodi di monitoraggio e controllo, anche in remoto, del comportamento strutturale applicabili a casi concreti (a titolo di esempio, applicazione di fibre ottiche, monitoraggio in emissione acustica, ecc.). Il controllo del danno nelle strutture potrà consentire di valutare in continuo l'efficacia dei lavori di miglioramento strutturale e di intervenire nel caso si verificano nuovi eventi di danno.

2.4. Definizione di un modello mirato alla simulazione del comportamento energetico, che consenta l'ottimizzazione delle principali variabili relative al risparmio energetico in funzione dei costi, e l'ideazione di una corretta metodologia di realizzazione pratica.

## 3. Terzo Anno

3.1. Progetto degli interventi su un caso di studio reale.

3.2. Applicazione di tecnologie che impieghino materiali innovativi, con valutazione dell'efficacia degli interventi non solo nei confronti delle azioni meccaniche, ma anche di quelle termiche ed ambientali.

3.3. Valutazione dell'efficacia degli interventi attraverso il monitoraggio del comportamento strutturale mediante metodi non distruttivi.

3.4. Valutazione e realizzazione degli interventi di miglioramento energetico necessari.

3.5. Applicazione del modello al caso di studio reale, con integrazione dei dati sperimentali, aggiornamento del modello e successiva analisi dei diversi profili energetico-economici ottenuti.

Il risultato complessivo che si vuole ottenere è la formulazione di un protocollo di analisi, di interventi, di controlli e di monitoraggio nel tempo che consenta la piena utilizzazione del costruito esistente, anche al di là delle prescrizioni minime di normativa.

Il controllo e monitoraggio in continuo dovrà essere applicato non solo al comportamento strutturale, ma anche alla verifica e al controllo in tempo reale delle condizioni legate ai consumi energetici e al mantenimento delle migliori condizioni ambientali, i.e. al controllo delle condizioni termo-igrometriche all'interno degli ambienti, con l'adozione di idonei strumenti automatici per favorire l'intervento, mediante apparecchiature connesse ai sensori di monitoraggio, per la correzione ed ottimizzazione delle condizioni di vivibilità.

Titolo del progetto (inglese): Applications of innovative materials and techniques to structural reinforcement and improvement of energy efficiency of buildings

Progetto di ricerca (inglese):

One of the most relevant aspects in the realization of reinforcement and restoration interventions in buildings is the minimization of time and costs, regarded as implementation costs, as well as costs tied to variables including, in particular, the need for temporary departure of users. Of primary importance is the definition of programming techniques and work implementation, which minimize inconveniences to users and provide the best possible result from the structural point of view.

These techniques have to be applied to traditional and innovative materials, whose advantage is the speed of application in spite of a process of structural element preparation, which can also be complex and time-consuming. Great attention should be paid to historical structures, largely consisting of masonries. In this case, the interventions must preserve the constituent material and be removable.

Interventions aiming at remarkable improvement of structural behavior require that the original behavior is substantially altered. The greater the theoretical safety degree achieved, the stronger are the needed structural changes. Stress state and dynamic response modifications follow, as a consequence of the attempt to give the structure a configuration similar to that it would have if it were designed and built according with contemporary building codes.

This research project aims at studying and applying structural restoration and reinforcement techniques which are effective on the static and dynamic behaviour, allowing at the same time exploitation of the residual strength of existing structures, in compliance with the static mechanisms consolidated over the years and in relation to the history of damage and/or degradation.

Damage and structural degradation may have affected a structure over time. They may have caused reductions in materials' resistance and affected deformability. All these aspects must be considered when designing restoration and reinforcement interventions.

Current techniques employing traditional and innovative materials will be investigated in order to establish intervention protocols on existing structures with the aim of improving the structural response and, at the same time, reduce the time required for carrying out interventions. In particular, an attempt will be made to integrate structural solutions with energy saving requirements: the definition of structural materials will go hand in hand and will be compatible with interventions aimed at containing energy consumption. Plant solutions will be studied with the objective of containing the consumption of energy, together with the full environmental comfort.

From a technical point of view, this will require a thermo-hygrometric stratigraphy analysis, as envisaged from the codes, in order to ensure the best air quality conditions. In this regard, controlled mechanical ventilation systems will be considered to guarantee air exchange, with the advantage of recovering part of the enthalpy content through heat exchangers, avoiding dispersion through windows and minimizing the load on air conditioning systems. A numerical model will be built and updated, feeding it with experimental data provided by sensors measuring the variables of interest, such as temperature and humidity probes.

The research project will deploy according to the following stages.

Structural stages.

1. Analysis of methods and materials currently used in restoration and in structural reinforcement, with comparison of times and costs of implementation.
2. Investigation of the effectiveness of different methods and materials observing their effects on the static and dynamic response of structures. At this stage, modelling and experimental tests in laboratory and in situ tests are foreseen.
3. Definition of removable structural interventions.
4. Application of innovative materials compliant with the consolidated statics of structures.
5. Comparison of the effectiveness of the proposed technologies and materials in relation to traditional methodologies.

Energy stages.

1. Installation of sensors for the continuous monitoring of thermo-hygrometric conditions, with the aim of maintaining the internal comfort.
2. Definition of a model enabling simulation of the building energy system.
3. Application and calibration of the model on a real case study.

From a structural point of view, it will be necessary to carry out accurate analyses of the current state, performing geometric and mechanical characterization of the building and of the constituent materials. This will be done through visual investigations and tests on extracted samples, trying to replace classic semi-destructive and destructive tests with non-destructive tests, as also envisaged by current codes.

At the same time a documentary due diligence will be carried out in order to acquire the greatest amount of information possible, to reduce uncertainties and to reach a high confidence factor.

The research program will be structured as follows, considering distinct phases dedicated to the analysis of the current state, to the theoretical-experimental analysis of the implementation methodologies, to the study of innovative applications for the solution of structural and environmental problems, and then to the planning and realization of a complete intervention.

1. First year.

- 1.1. Study of the materials in view to identify the most appropriate constitutive models. This is particularly important in the case of materials with pronounced non-linear behavior, which may reflect onto the macroscopic structural behavior.

- 1.2. Static and dynamic structural analyses on a model.
- 1.3. Overall investigations of the structural behavior, in order to evaluate the effectiveness of the model in describing deformation and damage phenomena.
- 1.4. In situ tests, i.e. dynamic tests with shakers or environmental noise, to extract the dynamic characteristics of the structure.
- 1.5. Implementation of numerical simulations providing reliable estimates of the energy performance of the building.
- 1.6. Implementation of the hardware infrastructure and sensors necessary for timely thermo-hygrometric analyses, with collection of archive data to be used in model optimization.

## 2. Second year

- 2.1. Study of methods and materials for structural reinforcement/rehabilitation, improving static and dynamic response.
- 2.2. Definition of the necessary numerical models able to simulate the response of these structural materials.
- 2.3. Analysis of methods for the monitoring and control, even from remote, of the structural behavior applicable to real cases (by way of example, optical fibers, acoustic emission monitoring, etc.). Online structural health monitoring will allow continuous evaluation of the effectiveness of the structural interventions or the possible outbreak of new damage.
- 2.4. Definition of a model aimed at simulating energy behavior, allowing optimization of the main parameters related to energy saving as a function of costs, and setup of a method for practical implementation.

## 3. Third Year

- 3.1. Design of interventions on a real case study, aimed at the obtaining of dramatic improvements in static and dynamic response.
- 3.2. Application of technologies employing innovative materials, with an estimate of the effectiveness of interventions concerning mechanical aspects as well as thermal and environmental issues.
- 3.3. Evaluation of the effectiveness of interventions by monitoring structural behavior with non-destructive methods.
- 3.4. Implementation of the necessary energy improvements.
- 3.5. Application of models to a real case study, updating of its response with experimental data and analysis of the different energy-economic profiles obtained.

The overall result expected is the formulation of a protocol of analysis, implementation, controls and monitoring over time allowing the full employment of residual resistance resources, trying to go beyond the minimum requirements of the codes at present in force.

Continuous control and monitoring will be applied not only to structural behavior, but also to the real-time monitoring and control of the conditions related to energy consumption and to the maintaining of optimal environmental conditions, i.e. to the optimization and control of the thermo-hygrometric conditions inside the rooms, employing suitable automatic tools to facilitate intervention and using equipment connected to a monitoring system.