



*Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca*



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE

***Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Strutture e del
Recupero Edilizio ed Urbano***

IX Ciclo N.S. (2007-2010)

**UN CONTRIBUTO ALLA PROGETTAZIONE DI
INTERVENTI DI RINFORZO DI STRUTTURE IN
MURATURA CON MATERIALI COMPOSITI:
INDAGINE SPERIMENTALE E MODELLI TEORICI**

- ABSTRACT -

Gianpietro Camorani

Il Tutor
Dott. Ing. Enzo Martinelli

Il Coordinatore
Prof. Ciro Faella

Gianpietro Camorani
**UN CONTRIBUTO ALLA PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI
RINFORZO DI STRUTTURE IN MURATURA CON MATERIALI
COMPOSITI: INDAGINE SPERIMENTALE E MODELLI TEORICI**

ABSTRACT
(english version follows)

Gli edifici in muratura sono ancora piuttosto diffusi anche in zone ad elevata sismicità, come i Paesi del bacino del Mediterraneo ed altre zone del mondo recentemente colpite da terremoti anche di notevole intensità. Ragion per cui, il rinforzo strutturale di elementi portanti in muratura è spesso necessario per incrementare la resistenza sismica, anche in accordo ai moderni codici normativi.

Il rinforzo a taglio di pannelli in muratura ed il confinamento delle colonne, sono alcuni degli interventi più comuni per incrementare la resistenza alle forze laterale della struttura ed aumentare la resistenza di elementi prevalentemente compressi, per far fronte al notevole incremento di sollecitazioni dovuto alle oscillazioni sismiche.

L'uso di materiali compositi fibrorinforzati a tali scopi è una delle possibili soluzioni, caratterizzata da un insignificante incremento dei pesi strutturali. Diverse tipologie di materiali compositi sono attualmente utilizzati nell'edilizia civile, d'altra parte c'è un'enorme variabilità di tipologie di muratura, sia in termini di materiali che di tessitura, come si evince dalle strutture esistenti. Conseguentemente e anche per la scarsa sperimentazione disponibile a riguardo, le formule predittive reperibili per la muratura rinforzata con FRP sono al momento molto meno affidabili delle corrispettive formulazioni per elementi in calcestruzzo. Inoltre, pochissimi sono i codici normativi specifici per il rinforzo di elementi in muratura con materiali compositi.

Il recente documento tecnico CNR 200 è tra i pochi, anche in ambito internazionale, a coprire tale campo le cui formulazioni presentate sono suscettibili di ulteriori migliorie.

Sulla base di tali considerazioni, la prima parte della tesi indaga il comportamento di interfaccia tra tessuti in materiali compositi su varie tipologie di elementi in muratura. Sono dapprima presentati i risultati di un'ampia campagna sperimentale condotta dall'autore presso il Laboratorio di Ingegneria Strutturale dell'Università di Salerno. In particolare sono stati analizzati tessuti a base di fibre di vetro e di carbonio incollate al supporto con

resina epossidica e rete a base di fibre di carbonio messa in opera con malta minerale (sistema CFRCM). Sono state utilizzate murature sia artificiali (laterizio) sia naturali (tufo, calcarenite e pietra calcarea) che, in via preliminare, sono state caratterizzate in termini di resistenza a compressione, trazione e modulo di Young. La scelta delle murature è stata dettata dal fatto che risultano tra le più diffuse proprio in Italia meridionale. Il lavoro è poi dedicato all'esposizione e discussione dei risultati sperimentali delle prove di aderenza condotte. Infine, i risultati sperimentali, sono stati utilizzati per la determinazione di una formula predittiva alternativa per la valutazione della massima forza di aderenza. Avendo determinato in maniera piuttosto precisa le principali caratteristiche meccaniche della muratura, si è potuto, infatti, pervenire ad una formulazione piuttosto vicina all'evidenza sperimentale.

La seconda parte della tesi è finalizzata a ricavare e calibrare una formula di progetto per ricavare la resistenza a compressione di colonne in muratura confinate con FRP. Dopo una breve introduzione sui concetti fondamentali riguardanti il confinamento in generale e la sua applicabilità ad elementi in calcestruzzo e muratura, viene raccolto e presentato un ampio database di prove sperimentali. Il database è stato ricavato raccogliendo prove reperibili in bibliografia e prove presentate dallo stesso autore in un recente articolo su rivista. Tale database è stato dapprima utilizzato per testare e validare alcune delle più diffuse formulazioni disponibili per la valutazione della massima resistenza a compressione di elementi confinati, tra cui anche quei pochi disponibili per la muratura confinata con FRP. I modelli analizzati hanno mostrato un'eccessiva dispersione ed una valutazione della resistenza a compressione spesso a svantaggio di sicurezza, e sono spesso calibrati per un solo tipo di muratura di base. E' stata proposta per questo una formula generale calibrata sui dati sperimentali. In linea di principio sono stati possibili diversi livelli di accuratezza nella calibrazione della relazione, in dipendenza dal numero di parametri coinvolti: più sono i parametri calibrati sperimentalmente, più accurata è la corrispondente formulazione. Infine, sono state proposte tre diverse formulazioni alternative per la valutazione della resistenza a compressione di colonne in muratura confinate con FRP, che permettono diversi livelli di approssimazione in termini di errore medio e dispersione.

Masonry structures are rather common even in seismic regions, like the countries in the Mediterranean basin and other regions which have been recently struck by significant earthquake. Hence, structural strengthening of their principal members is often necessary for enhancing their seismic resistance to meet the required safety standards.

Shear strengthening of masonry wall and confinement of masonry columns are the most common interventions which can be carried out for improving the lateral strength of the structure in order to face the earthquake induced actions and for enhance compression strength of structural elements. The use of composite materials for these purposes is one of the possible solutions, characterized by the reduced increases in structural weights. Various composite materials are nowadays available for using in the civil field and, moreover, a large variety of masonry qualities, in terms of both materials and textures, can be found in existing structures. Consequently, general formulae to structural strengthening of masonry members are much less established than the corresponding ones completely accepted for concrete structures. In fact, few codes of standards devoted to structural strengthening of existing structures through composite materials address the topic of masonry structures.

The recently issued Italian Code (CNR DT-200, 2004) actually does that. Although a large variety of masonry structures exist, only few experimental data are available and the calibration of the formulae adopted within that document would deserve further study.

On the basis of these general considerations, first part of the present thesis investigates the bonding behaviour of carbon- and glass-fibre reinforced polymers (FRP) glued on various kinds of masonry elements. It presents the results obtained a wide experimental campaign carried out by the author at the Laboratory of Structures of the University of Salerno (Italy).

In particular, the behaviour of carbon- and glass-fibre composite and laminates and CFRCM has been investigated. Four different types of masonry have been considered. Clay-bricks as well as some natural masonry elements (i.e., tuff or limestone) have been used for preparing a series of specimens for double shear pull-out tests. Clay-bricks as well as natural masonry elements among the most common ones in the Mediterranean basin (namely, tuff or limestone) have been used for preparing a series of specimens for double shear pull-out tests.

A preliminary experimental work has been carried out on samples of the masonry blocks for identifying the basic features of their mechanical behaviour. In particular, a wide series of masonry specimens have been tested in

compression and bending in order to evaluate their compressive and tensile strength.

The work is then devoted at reporting the results of pull-out tests on FRP laminates glued on different masonry blocks. The discussion of those results focuses on the ultimate strength of the FRP-to-masonry joints observed in the experimental tests.

Finally, the experimental results of pull-out tests will be utilized for assessing and possibly improving the theoretical formula for evaluating the ultimate strength of composite laminates glued on masonry, provided by recently issued Italian Guidelines. Since all the relevant mechanical properties of the masonry materials are available, a consistent relationship between such mechanical properties and the observed strength of the FRP laminates failing in delamination is proposed.

The second part of the thesis is aimed at assessing analytical formulations and calibrating an accurate and reliable design formula for FRP-confined masonry columns. After a short introduction about the key issues regarding the confinement of masonry columns by means of composite wrapping, a wide experimental database is assembled. Such a database has been obtained by merging the test results presented by the author in a companion paper with other ones available in the scientific literature. The content of the database, the nature of the specimens and the range of variation of the relevant parameters are reported in the paper. The most well-established analytical formulae for FRP-confined concrete members are then summarised and their effectiveness when applied to confined masonry elements is investigated on the basis of the collected database. The very limited number of models currently available for masonry members are also reported and discussed; they generally result in inaccurate and non-conservative predictions, as they have been commonly calibrated on experimental results specifically carried out on specific types of masonry. Finally, a general expression for a design-oriented formula is calibrated with respect to the above-mentioned experimental database. As a matter of principle, different levels of accuracy can be achieved in calibrating such an expression, depending on the number of parameters considered in its calibration: the higher the number of such parameters, the lower the expected residual error of the resulting formula. Thus, three different proposals of design formulae for FRP-confined masonry columns are reported and commented with the aim of describing their accuracy in terms of scatter, average error and distribution of the experimental-to-theoretical ratios.