

Universita' degli Studi di Brescia
Università degli Studi di Bergamo
Universita' degli Studi di Padova
Universita' degli Studi di Trento
Universita' degli Studi di Trieste
Istituto Universitario di Architettura di Venezia

Fabio Macobatti

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF
EARLY-AGE CRACKING IN RETROFITTING OF
EXISTING RC STRUCTURES**

Relatore/i:

Prof. Giovanni A. Plizzari

Prof. Jason W. Weiss

Ing. Fausto Minelli



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Dottorato di ricerca in Recupero di Edifici Storici e Contemporanei
XXVII ciclo

UNIVERSITY OF BRESCIA
PhD Program in "Structural Rehabilitation of Historical and Modern
Buildings"
XXVII cycle

Prof. Giovanni Plizzari (Coordinator)

PhD defense: April 1st, 2015

Dissertation defense board members:
Prof.ssa Dina D'Ayala, University College of London
Prof.ssa Lidia La Mendola, University of Palermo
Prof. Natalino Gattesco, University of Trieste

Author: Fabio Macobatti

Title: Experimental and numerical study of early-age cracking in retrofitting of existing RC structures

All rights reserved
© 2015 *Fabio Macobatti*

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted, in any form or by any means, without the prior written permission of the Editors.

SYNOPSIS

One of the main problem for existing Reinforced Concrete (RC) structures and infrastructures, in special case the piers of bridge, is the absence or the poor resistance to seismic actions due to the lack of knowledge of this topic during the design in past years. If the deterioration due to the environmental condition or the aging of materials (e.g., spalling) is added to at this problem, it is necessary to repair or strengthening the existing RC structure, so that it is possible to increase its service life.

During the last years, some different techniques of strengthening have been developed such as, for example, the jacketing made with reinforced concrete. This technique consists in a new layer of concrete added around the existing pier; thanks to development of High Performance Concrete (HPC) is possible to remove, or at least to decrease, the traditional steel reinforcement and to cast jacketing with a reduced thickness. A small thickness with HPC for the jacketing is an advantage because it reduces the added weight (and thus the seismic load) to the existing structure and gives greater protection, which these materials can offer thanks to their low porosity. The retrofitting of existing piers with jacketing made in High Performance Concrete (HPC) is one of the most convenient techniques because the impact of works on the traffic and costs are lower than other solutions. In fact the jacketing can be applied around existing piers without closing the deck of bridge.

The main disadvantage is due to high risk of early age cracking (≤ 3 days) due to restrained shrinkage that could reduce the effect of the jacketing, or better could lead to a reduction of the ultimate strength and the service life of pier. In High Performance Concrete the early age cracking is related to high rate of shrinkage (at 28 days the rate of shrinkage could reach 800-1000 $\mu\text{m}/\text{m}$); this is not a problem for the concrete free to shrink, while, in the restrained element, tensile stresses are generated into the element and when the stresses are greater than the tensile strength the first cracks appear. The use of Fiber Reinforced Concrete (FRC) allows controlling the crack opening. Usually in these materials it is possible to observe a diffused micro-cracking instead of large macro-cracking as for plain concrete. A possible solution for reducing the rate of shrinkage consists in using the Internal Curing (IC). Internal curing is defined as supplying water throughout a freshly placed cementitious mixture using reservoirs, via pre-wetted Lightweight Aggregates (LWA), that readily release water as needed for hydration or to replace moisture lost through evaporation or self-desiccation. Thanks to casual dispersion of LWA the water released into the element is more uniform than the water penetrated during the external curing; in this last technique the external surface is wetted, so that the difference between external and internal curing in the first case allows the water only to penetrate several millimeters into low water to cement ratio concrete, whereas internal curing enables the water to be distributed more equally across the cross section. Another advantage due to use the LWA is that specific gravity of concrete with IC is lower than plain concrete and so when this material is used to repair or strengthening the new weight added to the existing structure is lower than same intervention made with normal concrete.

Taking into account the advantages and disadvantages of the use of HPC and IC, the high performance concrete with internal curing for retrofitting is studied in this thesis. An experimental campaign is carried out with the goal to compare a traditional concrete C40 and a high performance concrete C80. For each material were casted and tested plain concrete specimens, specimens with hybrid fibers and in the end specimens with hybrid fibers and internal curing. The use of concrete with hybrid fibers and internal curing may lead an increase of service life of existing structure because the protection offered to the existing element by new layer is greater thanks to lower probability of cracking; in addition the new weight added due to the new layer is lower than same layer made with traditional concrete, because a part of sand of traditional mix design is replaced with lightweight aggregate. Known the experimental results the numerical

analyses were conducted on segment of pier in scale with the aim to study the effect of restrained shrinkage. For validating the numerical model an experimental campaign on segment of pier in scale is also performed.

During the experimental research a new laboratory test on curved beam was introduced (the geometry is the same of the half-ring) with the goal to measure the toughness of the material in a specimen which can develop stresses similar to that observed in the ring test. The load configuration able to obtain the same distribution of stresses of ring test with just four point of load, allows getting a distribution of stresses very close to the ring test stresses.

SOMMARIO

Uno dei maggiori problemi delle costruzioni esistenti, in special modo delle pile da ponte, riguarda l'assenza o la scarsa resistenza alle azioni sismiche spesso dovuta alla scarsa conoscenza del tema al tempo della progettazione. Se a questo si aggiunge il degrado dovuto al passare del tempo (es. spalling) ecco che si rende necessario un intervento con l'obiettivo di rimettere a nuovo la struttura e garantirne così una vita utile maggiore.

Nel corso degli anni diverse tecniche di rinforzo sono state sviluppate, tra queste si annovera ad esempio l'incamiciatura in calcestruzzo. Quest'ultima tecnica prevede la realizzazione di un nuovo strato di calcestruzzo attorno alla pila esistente; con l'avvento di nuovi calcestruzzi fibrorinforzati ad elevate prestazioni è stato possibile eliminare, o quantomeno diminuire, le barre di armatura tradizionale e di conseguenza oggi è possibile realizzare camicie di rinforzo con spessori più contenuti. Uno spessore ridotto della camicia realizzata con calcestruzzi ad alte prestazioni consente di apportare un carico minore alla struttura esistente, di conseguenza anche l'aumento dell'azione sismica legata alla nuova massa aggiunta sarà inferiore. Inoltre, grazie alla bassa porosità di questi materiali, questa tecnica fornisce una protezione maggiore alla struttura esistente riparata o rinforzata. Infine un altro vantaggio che rende la tecnica dell'incamiciatura molto competente, è legato ai lavori di messa in opera della stessa, infatti, è possibile realizzare l'incamiciatura delle pile da ponte senza necessariamente chiudere l'impalcato, in questo modo quindi tutti i disagi legati alla chiusura di una strada sono evitati.

Lo svantaggio principale invece è legato all'elevato rischio di prematura fessurazione ($t_{cr} \leq 3$ giorni) che potrebbe inficiare l'effetto del rinforzo, o meglio potrebbe portare ad un abbattimento della resistenza ultima e della vita utile dell'opera. La prematura fessurazione in questi materiali è legata all'elevato grado di ritiro che essi manifestano (a 28 giorni si raggiungono anche gli 800-1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ di deformazione), che di per se non creerebbe nessun problema se il materiale fosse libero di ritirare, tuttavia essendo vincolato dall'elemento esistente interno, si vengono a formare delle azioni di trazione all'interno del materiale che, vista la bassa resistenza nei primi giorni successivi al getto, può portare alla prematura fessurazione. La presenza delle fibre all'interno della matrice consente un controllo della fessurazione e in alcuni casi è possibile osservare una microfessurazione diffusa piuttosto che poche fessure, ma con aperture maggiori, come si osserva di solito nei calcestruzzi non fibrorinforzati. Una possibile tecnica in grado di limitare il ritiro del materiale è nota come internal curing e consiste nel sostituire parte della sabbia contenuta nel calcestruzzo con aggregati leggeri di dimensioni comparabili, ma saturi di acqua; la parte di aggregati da sostituire è calcolata in modo tale da eliminare il ritiro chimico. Grazie alla dispersione casuale degli aggregati al momento del getto, si ha che l'acqua rilasciata dagli aggregati leggeri si trova all'interno di tutto l'elemento, questo è un grosso punto a favore rispetto all'external curing, pratica che consiste nel bagnare superficialmente l'elemento appena gettato in modo da contenere l'evaporazione dell'acqua contenuta nell'impasto, con questa tecnica, però l'acqua aggiunta riesce a penetrare solo superficialmente dal momento che già dalle primissime ore successive al getto si ha la formazione dello scheletro solido dell'elemento che quindi impedisce la percolazione dell'acqua. Un secondo vantaggio derivante dall'utilizzo di aggregati leggeri consiste nel realizzare calcestruzzi con un peso specifico inferiore a quello tradizionale e quindi l'utilizzo di questi materiali per riparare o rinforzare le strutture esistenti porta ad aggiungere carichi inferiori, rispetto a quelli che si avrebbero nel caso in cui l'incamiciatura fosse realizzata con un materiale tradizionale.

Alla luce di quanto brevemente esposto, si è deciso di approfondire lo studio di calcestruzzi ad elevate prestazioni impiegati nella riparazione e nel rinforzo di strutture esistenti, controllando il ritiro mediante l'introduzione dell'internal curing. E' stata avviata una campagna sperimentale con l'obiettivo di confrontare un materiale tradizionale (un calcestruzzo C40) e un calcestruzzo ad elevate prestazioni (un calcestruzzo

C80); per entrambi i materiali sono stati gettati e testati provini bianchi (cioè la sola matrice senza fibre e senza internal curing), provini con fibre ibride e infine provini con fibre ibride e internal curing L'impiego di materiali con fibre ibride e internal curing può portare ad un aumento della vita utile della struttura in quanto la protezione offerta alla struttura esistente risulta maggiore visto la minore probabilità di fessurazione; in più i carichi aggiunti dovuti all'incamiciatura sono inferiori a quelli dello stesso materiale senza internal curing, perché parte della sabbia dell'impasto viene sostituita con aggregati alleggeriti. Noti i risultati sperimentali sono poi state condotte analisi numeriche su un segmento di pila da ponte in scala con l'obiettivo di studiare gli effetti del ritiro vincolato. Per validare il modello numerico è stata condotta anche una campagna sperimentale relativa sempre al rinforzo di un segmento di pila da ponte soggetto a ritiro.

Parallelamente a questo, è stata anche introdotta una nuova prova di laboratorio con l'obiettivo di misurare la tenacità del materiale in un provino (la cui geometria rappresenta un semi-ring) che presenti un andamento degli sforzi simile a quello che si osserva nella prova del ring test. La situazione di carico adottata, che permette di ottenere una distribuzione di sforzi molto simile a quella osservata nel ring test, prevede l'applicazione di quattro punti di carico radiali le cui posizioni sono state ricavate a seguito di un'analisi numerica.