

Giovanni Mantegazza\*

## Efficacy of FRCM in earthquake – proofing of the Church of Madonna di Centurelle (L'Aquila – Italy)

## Efektywność materiałów FRCM w przypadku trzęsień ziemi – zabezpieczenie Kościoła Madonna di Centurelle (L'Aquila we Włoszech)

### Introduction

The Church of the Madonna di Centurelle has seen some radical changes over its centuries-long history: historical sources confirm the existence of another religious building in the 11<sup>th</sup> century, perhaps built over an existing archaic building, rebuilt in 16<sup>th</sup> century, then expanded and repaired following earthquake damage in the eighteenth century and abandoned to decay in the nineteenth and twentieth centuries.

In 1950 it was proposed that the church should be demolished, but in 1965 it was consolidated and then used as an animal shelter until the '80s.

The most radical, invasive structural changes since the 16<sup>th</sup> century were performed between 1965 and 1968, when the church was in such a state of decay that it was in danger of collapse and required major work to halt its decline, performed using the equipment and technologies commonly in use at the time.

In an earthquake zone, the severest test of a consolidated structure and the technologies used on it is unfortunately further telluric stress.

The April 2009 earthquake in Abruzzo put the earthquake-proofing techniques used in 2003 to the test: an extremely severe test that revealed the efficiency of Ruredil's FRCM reinforcement systems.

### Wstęp

Kościół Madonna di Centurelle przeszedł w swojej wielowiekowej historii radykalne zmiany: źródła historyczne potwierdzają istnienie innego budynku kultu w XI w., który być może był nadbudowany na wcześniejszej budowli antycznej, został przebudowany w XVI w., a następnie rozbudowy i wyremontowany po uszkodzeniach spowodowanych trzęsieniem ziemi w XVIII w. Następnie został porzucony i w XIX i XX w. stopniowo niszczał.

W 1950 r. zaproponowano rozbiórkę kościoła, ale w 1965 r. budynek został umocniony i był następnie używany jako schronienie dla zwierząt aż do lat 80. XX w.

Najbardziej radykalne od wieku XVI, inwazyjne wręcz zmiany konstrukcyjne wprowadzono między 1965 r. a 1968 r., kiedy kościół był zniszczony do tego stopnia, że zagrażał zawaleniem i wymagał poważnych prac, aby się nie rozpaść. Prace te wykonano za pomocą technologii stosowanych typowo w tamtych czasach.

W rejonach sejsmicznych najpoważniejszym testem, jaki przechodzą umocnione konstrukcje i stosowane technologie, jest niestety dalszy nacisk energii ziemi.

W kwietniu 2009 r. trzęsienie ziemi w Abruzzo przetestowało techniki zabezpieczeń antysejsmicznych użyte w 2003 r: ten niezwykle ciężki test dowiódł skuteczności systemów umocnień FRCM firmy Ruredil.



Centurelle Church – July 2009 after earthquake  
*Kościół Centurelle – lipiec 2009 po trzęsieniu ziemi*

## The Church

Travellers approaching along state highway number 17 come to the church of Madonna di Centurelle in a questioning spirit due to the striking appearance of this simple abandoned building which nonetheless preserves the dignity and memory of days gone by when it was a landmark on the plateau, when its name appeared on the oldest maps of the sheep-tracks and was known as far away as in Puglia.

The first things that strike the visitor approaching the church today are its imposing size, peculiar architecture and historical heritage; they will also note a small arcade, a well and, finally, the coat of arms and discrete decorations bearing the symbols of Pope Celestine V, still testifying to his power over the local society and economy three centuries after his death.

### Work performed in 1997-2000

The building's decay and abandonment, aggravated by the 1997 earthquake, caused lesions running right through it, vertically marking the side walls near the façade up to the level of the work performed in April 1999. The first stage in the work involved demolition and removal of the reinforced concrete roof and cement slabs, the condition of which, having become precarious due to the state of the cement conglomerate, did not offer a sufficient guarantee of stability. The raised walls were reinforced

## Kościół

Podróźni podjeżdżający autostradą krajową numer 17 docierają do kościoła Madonna di Centurelle pełni niepewności z powodu niezwykłego wyglądu tego prostego, porzuconego budynku, który zachował jednak godność i pamięć o dawnych dniach, kiedy był znakiem rozpoznawczym tej równiny, a jego imię pojawiało się na najstarszych mapach tras przeprowadzania owiec i było sławne nawet w Apulii.

Współczesnego turystę odwiedzającego kościół uderza przede wszystkim jego imponujący rozmiar, niezwykłość architektury i dziedzictwo historyczne; uwagę zwraca także niewielka arkada, a wreszcie herb i dyskretne dekoracje z symbolami Celestyna V, które jeszcze dziś, trzy wieki po śmierci tego papieża, świadczą o jego potęgze w miejscowej społeczności i gospodarce.

### Prace wykonane w latach 1997-2000

Proces niszczenia porzuconego budynku, wraz z trzęsieniem ziemi z 1997 r., spowodował zmiany przebiegające w poprzek kościoła i znaczące pionowymi rysami ścianę w pobliżu fasady aż do poziomu prac podjętych w kwietniu 1999 r. Pierwszy etap obejmował rozbiórkę i usunięcie dachu z żelbetu oraz płyt z cementu, których stan stał się niebezpieczny w wyniku niszczenia konglomeratu cementu i nie gwarantował stabilności. Wzniesione ściany umocniono odpowiednią liczbą zastępczych kamieni (*cuci-scuci*),

with a consistent amount of stone replacement (*cuciscuci*) work, the interior was plastered and new installations were added along with ventilation spaces, floors and new chestnut window and door frames. The flooring and plasterwork was also redone.

In the interior of the church, the vaults were temporarily shored up. A similar structure of buttressed joined pipes was built on the outside of the church, and excavations were dug near the walls to check the condition of the foundations.



wnętrze otynkowano i dodano nowe instalacje wzdłuż przewodów wentylacyjnych, podłóg, nowych ram drzwi i okien z drewna orzechowego. Ponownie wykonano także posadzki i tynki.

We wnętrzu kościoła wstawiono tymczasowe podpory sklepienia. Podobne konstrukcje z podpartych połączonych rur zbudowano na zewnątrz kościoła, a przy ścianach przeprowadzono wykopy, aby sprawdzić stan fundamentów.



### Work performed in 2001-2003

The 1998 project allowed the church to be made safe and partially recovered the annexed premises used as a Documentation Centre.

The project was developed on the basis of past experience, studies, graphic surveys that were already available and the diagnosis of instability.

### Goals of the project

Restoration of the church of Madonna di Centurelle was intended to solve the problems of static instability that had compromised its conservation, applying the most appropriate measures for earthquake-proofing the church with the goal of achieving improved safety. The idea was to plan and implement a systematic set of structural improvement works without substantially modifying the building's overall behaviour, and therefore without making it a different building than it was.

To achieve this goal, the project was divided into a preordained sequence of tasks aimed at:

### Prace wykonane w latach 2001-2003

Projekt z 1998 r. pozwolił doprowadzić kościół do stanu, kiedy budynek był bezpieczny i dobudowano do niego nową część, która służyła jako Centrum Dokumentacji.

Projekt był oparty na wcześniejszych doświadczeniach, badaniach, kontrolach graficznych, które były dostępne wcześniej, oraz na diagnozie niestabilności.

### Cele projektu

Restauracja kościoła Madonna di Centurelle miała na celu rozwiązanie problemów statycznej niestabilności, która była problemem wcześniejszej konserwacji, z zastosowaniem najstaranniejszych pomiarów tak, aby zapewnić ochronę kościoła na wypadek trzęsienia ziemi. Założeniem było zaplanowanie i realizacja systematycznego zestawu prac rozwijających konstrukcję bez wprowadzania zasadniczych zmian w ogólnym zachowaniu budynku, to znaczy tak, aby nie zmienić kościoła w inny budynek niż był.

Aby to osiągnąć, projekt podzielono na z góry zdefiniowaną sekwencję następujących zadań:

- Adding to the temporary shoring and supporting structures;
  - Consolidating the church's load-bearing walls;
  - Removing the roof covering and cement slabs;
  - Checking the apical edging and proceeding to anchor it to the masonry below;
  - Building a temporary roof structure;
  - Inserting a system of metal tie rods crosswise above the vaults;
  - Consolidating the vaults on the extrados;
  - Proceeding to cut and remove individual reinforced concrete dividers while preserving the reinforced concrete apical edging;
  - Building a new steel roof structure consisting of braced girders with sandwich panels over them on which the waterproofing structures rest;
  - Laying the backbone of the electrical wiring on the extrados of the vaults;
  - Creating a new roof covering;
  - Restoring the intrados of the vaults, completing their consolidation with localised micropinning and reinforced seams;
  - Restoring the walls of the outer façades, while at the same time proceeding to consolidate the elements jutting out of the façade and the windows.
- Uzupełnienie tymczasowych podpór i struktur wzmacniających;
  - Konsolidacja ścian nośnych kościoła;
  - Usunięcie pokrycia dachu i płyt cementowych;
  - Sprawdzenie krawędzi szczytowych i przygotowanie ich zakotwiczenia w murach poniżej;
  - Wybudowanie tymczasowej konstrukcji dachowej;
  - Umieszczenie systemu metalowych cięgien poprzecznych nad sklepieniami;
  - Konsolidacja górnej płaszczyzny sklepień;
  - Przygotowanie do wycięcia i usunięcia poszczególnych elementów dzielących z żelbetu przy zachowaniu krawędzi szczytowych z żelbetu;
  - Wybudowanie nowej konstrukcji dachowej ze stali składającej się z umocnionych dźwigarów i paneli wielowarstwowych, na których opierają się struktury zabezpieczające przed penetracją wody;
  - Ułożenie głównej części instalacji elektrycznej w grzbietowej części sklepień;
  - Stworzenie nowego okrycia dachu;
  - Odnowienie podniebienia sklepień, dokończenie ich konsolidacji za pomocą miejscowego zakotwiczenia i zbrojonych szwów;
  - Renowacja ścian zewnętrznej fasady, a jednocześnie przygotowanie do konsolidacji elementów wystających z fasady i okien.

### Consolidation of the walls

The masonry on the site of the vertical lesions was rebuilt over its entire extent using the stone replacement or *cuci-scuci* method in order to restore the original structural behaviour of the walls. The next stage involved restoration of the masonry core, working from the outside by making holes and injecting Rurewall B1 from Ruredil SPA, a mixture of pozzolanic binders, under very low pressure. Surveys prior to the project revealed a structural deficiency in the vertical masonry, which essentially consisted of dry walls varying in thickness from 0.80 to 1.20 m.

It was therefore necessary to proceed to restore individual portions of wall, removing the unsafe parts and rebuilding the structure on the basis of its original plumb line so as to restore the load-bearing function of the raised masonry. When consolidation had been completed, the unsafe parts of the single-light windows were numbered and removed, then put back in their original location and anchored there. Restoration of the original behaviour of the building's box-shaped organism and therefore improvement of its earthquake resistance was assured by reinforced seams which crossed practically aligned with points of structural fragility.

### Konsolidacja ścian

Murowana konstrukcja ścian w miejscu pionowych zmian została odbudowana w pełnym zakresie metodą wymiany kamiennej, czyli *cuci-scuci*, aby przywrócić pierwotne zachowanie strukturalne ścian. W następnym etapie odnowiono rdzeń konstrukcji murowanej od zewnątrz, robiąc dziury i wstrzykując pod bardzo niskim ciśnieniem Rurewall B1 z Ruredil SPA, mieszaninę spoiw pucolanowych. Kontrole wykonane przed projektem wykazały braki konstrukcyjne w pionowej konstrukcji, która zasadniczo składała się z suchych ścian o grubości od 0,80 do 1,20 m.

Konieczne było zatem podjęcie renowacji pojedynczych części ściany, usunięcie niebezpiecznych części i odbudowa konstrukcji w oparciu o jej pierwotny pion, aby przywrócić funkcję nośną wzniesionych murów. Po ukończeniu konsolidacji policzono i usunięto niebezpieczne części jednoczęściowych okien, a następnie wstawiono je z powrotem i zakotwiczo w ich pierwotnym położeniu. Zadbano o restaurację pierwotnego zachowania budynku jako organizmu w kształcie pudełka, co oznaczało wzmocnienie jego odporności na trzęsienia ziemi, używając do tego zbrojonych szwów, które przechodziły praktycznie równo z punktami konstrukcyjnej wrażliwości.

## Removal of the roof

After completion of the work on the perimeter walls, it was possible to proceed with removal of the roof covering and the cement slab, proceeding to cut individual portions of surfaces held in tension with the aid of a crane and then brought to the ground.

## Consolidation of the vaults

After creating holes for injection and thoroughly washing the affected areas, work began on the first stage in the process of consolidation of the masonry mass of the vault, injecting Rurewall B1 under very low pressure. According to the project calculations, the surface of the extrados was anchored to the outer walls with metal reinforcements; according to the original plan, consolidation was then to have been completed with plating of critical parts of the extrados with carbon fibre strips and epoxy formulas. But while the work was underway, the complex structural issues at stake suggested study

## Usunięcie dachu

Po ukończeniu prac na obwodzie ścian można było podjąć się usunięcia pokrycia dachu i płyt z cementu, zajmując się wycinaniem poszczególnych części powierzchni utrzymywanych za pomocą dźwigu, a następnie ściąganych na ziemię.

## Konsolidacja sklepień

Po przygotowaniu dziur do wstrzykiwania i starannym oczyszczeniu danych obszarów, rozpoczął się pierwszy etap procesu konsolidacji masy murowanej sklepienia za pomocą wstrzykiwania Rurewall B1 pod bardzo niskim ciśnieniem. Zgodnie z wyliczeniami projektowymi, powierzchnia grzbietu łuku została zakotwiczona w zewnętrznych ścianach metalowymi umocnieniami; oryginalny plan przewidywał następnie zakończenie konsolidacji poprzez pokrycie krytycznych punktów grzbietu płytami z taśmami z włókien węglowych i formułami epoksydowymi. Jednak w trakcie pracy pojawiły się złożone



Preparation of vault's surface  
*Przygotowanie powierzchni sklepienia*



Application of Ruredil X Mesh C10 at vault's extrados  
*Wprowadzenie Ruredil X Mesh C10 na grzbiecie sklepienia*

of an alternative technical solution, in the attempt to identify the solution best suited to the specific situation, such as use of innovative compositional reinforcement systems like as Ruredil X Mesh C10. Rough parts of the extrados were levelled with application of a base layer made with Rurewall R/Z – (a transpiring premixed mortar containing small quantities of water-soluble salts). The surface thus prepared was then covered with a first layer of Ruredil X Mesh M25 about 3 mm thick, in which the Ruredil X Mesh C10 carbon mesh was buried, covered with an additional 3 mm layer of Ruredil X Mesh M25. The structural compound was applied on the basis of predetermined geometries, at 45° with respect to the weave of the vaults, carefully anchoring it to the side walls. Consolidation of the intrados, on the other hand, required methodical care because the apparatus presented large areas of crumbling, unsafe material. After scarifying the joints between the stones, they were roughed in with optimised mortars in colours compatible with the existing ones; in many cases the restoration had to be supported by localised consolidation, with anchorage and locking of individual elements using micro-pins held in place with resins. Consolidation of the arches was particularly complex, as the hewn stones showed clear signs of structural suffering, with fragmentation and expulsion of material as well as ruin largely due to modifications to the geometry of the construction, with evident typical collapse localised at the keystone and the back. Here the decision was made to maintain the existing configuration, anchoring the arch at the top while preserving the geometries altered by collapse: a situation which is particularly apparent in the first arch, in which the brick reconstruction of the central part reveals the collapse it had suffered. In this case, the adjacent vaults came to be lower than the arch itself, and it was necessary to anchor the elements to one another and work on the brick ones, most of which had suffered damage.

## The facade

Structural work was therefore concentrated on the façade of the church, the perimeter of which, in regular slabs of hewn stone interrupted by the cornice, the rose window and the projecting moulding, revealed clear vertical lesions and collapse underway in protruding parts. Restoration of the parameter first required consolidation of the damaged parts and the individual stone elements with rein-

problemy konstrukcyjne, które wymusiły rozważenie alternatywnego rozwiązania technicznego, aby zidentyfikować rozwiązanie najlepiej dostosowane do tej konkretnej sytuacji, np. zastosowanie innowacyjnych mieszanych systemów wzmacniających, takich jak Ruredil X Mesh C10. Szorstkie części grzbietu wyrównano warstwą gruntową z Rurewall R/Z – (oddychająca wcześniej mieszana zaprawa zawierająca niewielką ilość soli rozpuszczalnych w wodzie). Tak przygotowana powierzchnia została potem pokryta pierwszą warstwą Ruredil X Mesh M25 o grubości ok. 3 mm, w której zatopiona była siatka węglowa Ruredil X Mesh C10, przykryta następnie kolejną 3-milimetrową warstwą Ruredil X Mesh M25. Związek strukturalny został wprowadzony zgodnie z wcześniejszymi obliczeniami geometrycznymi, pod kątem 45° do splotu sklepień i ostrożnie zakotwiczony w ścianach bocznych. Natomiast konsolidacja grzbietu wymagała ogromnej metodyczności, ponieważ aparaty pomiarowe wykazały obecność dużych obszarów kruszącego się, niebezpiecznego materiału. Po zerwaniu łączy między kamieniami, poddano je wstępnej obróbce optymalnymi zaprawami w kolorach kompatybilnych z wcześniejszą kolorystyką; w wielu przypadkach trzeba było uzupełnić restaurację miejscową konsolidacją z zakotwiczeniem i blokowaniem poszczególnych elementów mikro-swozrzeniami, które utrzymywała w miejscu żywica. Konsolidacja łuków była szczególnie trudna, ponieważ ociosane kamienie były wyraźnie uszkodzone, nastąpiła fragmentacja i wypadanie materiału oraz niszczenie spowodowane głównie zmianami w geometrii konstrukcji, czego typowym przykładem było miejscowe zawalenie zwornika i części tylnej. W tym przypadku zdecydowano o utrzymaniu istniejącej konfiguracji, zakotwiczeniu łuku i góry, a jednocześnie zachowaniu geometrii, którą odmieniło zawalenie: ta sytuacja była szczególnie widoczna przy pierwszym łuku, gdzie ceglana rekonstrukcja części środkowej pokazuje, gdzie nastąpiło załamanie. Przylegające sklepienia znalazły się niżej niż sam łuk i konieczne było wzajemne zakotwiczenie tych elementów i praca z elementami ceglanymi, z których większość była uszkodzona.

## Fasada

Prace konstrukcyjne skoncentrowały się zatem na fasadzie kościoła, którego obwód, pokryty regularnymi płytami ciosanego kamienia z gzymsem, rozetą i wystającą listwą, był uszkodzony pionowymi zmianami i zapadnięciami części poniżej wystających elementów. Restauracja obwodu wymagała przede wszystkim konsolidacji uszkodzonych części i poszczególnych elementów kamiennych zbro-

forced seams, integrated with injections of optimised mortar to the masonry below, while specialised workers applied traditional techniques for treatment of the perimeter to the surface apparatus of the regular hewn stones.

After the 2003 restoration the church survived the April 2009 earthquake without structural damage, thanks to the earthquake-proofing it had undergone with Ruredil X Mesh C10.

### **Conclusion**

The Ruredil X Mesh C10 structural reinforcement system effectively improved the resistance to seismic activity of the Church of the Madonna di Centurelle. The April 6 2009 earthquake that destroyed 50 % of all the buildings (old and new) in L'Aquila and its province caused no damage whatsoever to the vaults to which the Ruredil X Mesh C10 reinforcement system had been applied.

jonymi szwami w połączeniu ze wstrzykiwaniem zoptymalizowanej zaprawy do murów poniżej, a jednocześnie robotnicy specjaliści naprawiali tradycyjnymi technikami obwód i powierzchnię regularnych ciosanych kamieni.

Po restauracji wykonanej w 2003 r. kościół przetrwał trzęsienie ziemi z kwietnia 2009 r. bez uszkodzeń konstrukcyjnych. Pozwoliło na to zabezpieczenie przeciw skutkom trzęsień ziemi za pomocą Ruredil X Mesh C10.

### **Wniosek**

System umocnień konstrukcji Ruredil X Mesh C10 przyniósł faktyczną poprawę odporności kościoła Madonna di Centurelle na skutki aktywności sejsmicznej. Trzęsienie ziemi z 6 kwietnia 2009 r., które zniszczyło 50 % wszystkich budynków (starych i nowych) w L'Aquila i całej prowincji, nie uszkodziło w ogóle sklepień, które zostały zabezpieczone systemem Ruredil X Mesh C10.

---

\*Ruredil Spa, San Donato Milanese, Milano, Italy

\*\*Ruredil Spa, San Donato Milanese, Mediolan, Włochy