

02

international journal of architectural  
conservation and restoration

intrecci

2022  
ISSN 2974-8577

Luigi **BARAZZETTI**  
Zaira **BARONE**  
Cristina **BONIOTTI**  
Lorenzo **CANTINI**  
Silvia **CERISOLA**  
Barbara **FAZION**  
Cinzia **FERRARA**  
Luigi **FREGONESE**  
Nicola **GRILLANDA**  
Giovanni **GUALERZI**  
Gabriele **MILANI**  
Daniela **ORENI**  
Gian Marco **PRISCO**  
Valentina **RUSSO**  
Barbara **SCALA**



SIRA  
Società Italiana  
per il Restauro  
dell'Architettura

# intrecci

International Journal of Architectural  
Conservation and Restoration

anno I (2022) n. 2

ISSN 2974-8577

## editore

SIRA Società Italiana per il Restauro dell'Architettura

## direttore

Stefano Della Torre | Politecnico di Milano

## comitato scientifico internazionale

Howayda Al-Harithy | American University of Beirut  
Tor Broström | Uppsala University  
Francesco Doglioni | già Università IUAV di Venezia  
Donatella Fiorani | Sapienza Università di Roma  
Fakher Kharrat | Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis  
Beatriz Mugayar Kühl | University of São Paulo  
Alessandra Marino | Ministero della Cultura  
Randall Mason | University of Pennsylvania  
Costanza Miliani | Consiglio Nazionale delle Ricerche  
Antonia Moropoulou | National Technical University of Athens  
Stefano F. Musso | Università degli Studi di Genova  
Valérie Nègre | Université Paris 1 Panthéon Sorbonne  
Jorge Otero-Pailos | Columbia University  
Teresa Patricio | International Council on Monuments and Sites  
Pere Roca | Universitat Politècnica de Catalunya  
Ana Pereira Roders | Delft University of Technology  
Mario Santana-Quintero | Carleton University  
Ruxandra-Iulia Stoica | The University of Edinburgh  
Alessandra Vittorini | Ministero della Cultura

## comitato editoriale

Maria Teresa Campisi | Università degli Studi di Enna "Kore"  
Eva Coisson | Università degli Studi di Parma  
Sara Di Resta | Università Iuav di Venezia  
Marina Ducci | Sapienza Università di Roma  
Caterina Giannattasio | Università degli Studi di Cagliari  
Maria Adriana Giusti | Politecnico di Torino  
Pietro Matracchi | Università degli Studi di Firenze  
Renata Picone | Università degli Studi di Napoli Federico II  
Antonio Pugliano | Università degli Studi Roma Tre  
Valentina Russo | Università degli Studi di Napoli Federico II  
Emanuela Sorbo | Università Iuav di Venezia

## segreteria di redazione

coordinamento

Nino Sulfaro | Università Mediterranea di Reggio Calabria

Zaira Barone | Università degli Studi di Palermo  
Cristina Boniotti | Politecnico di Milano  
Silvia Cutarelli | Sapienza Università di Roma  
Chiara Mariotti | Università Politecnica delle Marche  
Valentina Pintus | Università degli Studi di Cagliari  
Stefania Pollone | Università degli Studi di Napoli Federico II  
Lia Romano | Università degli Studi di Napoli Federico II  
Leila Signorelli | Alma Mater Studiorum - Università di Bologna  
Oana Tiganea | Politecnico di Milano  
Monica Vargiu | Università degli Studi di Cagliari  
Luigi Veronese | Università degli Studi di Napoli Federico II  
Alessia Zampini | Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

## progetto grafico e layout editing

dnaitalia.com

[sira-restauroarchitettonico.it/intrecci/](http://sira-restauroarchitettonico.it/intrecci/)



- 5** **Cultura materiale e presidi costruttivi nel cantiere medievale. Nuovi dati dal Castello di Cervinara**  
Material culture and prevention damage expedients in the medieval construction yard. New data from the Castle of Cervinara  
Valentina Russo, Gian Marco Prisco
- 25** **Valorizzazione del patrimonio culturale: il ruolo del capitale territoriale**  
Valorization of cultural heritage: the role of territorial capital  
Cristina Boniotti, Silvia Cerisola
- 41** **Analisi di una struttura complessa in muratura: la volta ad ombrello della *camera picta* di Castel Masegra a Sondrio**  
Analysis of a complex masonry structure: the umbrella vault of the *camera picta* in Masegra Castle, Sondrio  
Lorenzo Cantini, Nicola Grillanda, Luigi Barazzetti, Daniela Oreni, Gabriele Milani
- 59** **Geomatica e conservazione: parametrizzazione di elementi unici e ripetuti**  
Geomatics and conservation: parameterization of unique and repeated elements  
Barbara Scala, Barbara Fazion, Luigi Fregonese, Giovanni Gualerzi
- 77** **Restauro e Comunicazione**  
Restoration and Communication  
Zaira Barone, Cinzia Ferrara



**intrecci**

International Journal of Architectural  
Conservation and Restoration



# Analisi di una struttura complessa in muratura: la volta ad ombrello della *camera picta* di Castel Masegra a Sondrio

Analysis of a complex masonry structure: the umbrella vault of the *camera picta* in Masegra Castle, Sondrio

**Lorenzo Cantini**  
Politecnico di Milano

**Nicola Grillanda**  
University of Sheffield

**Luigi Barazzetti**  
Politecnico di Milano

**Daniela Oreni**  
Politecnico di Milano

**Gabriele Milani**  
Politecnico di Milano



**intrecci** anno I (2022) n. 2  
ISSN 2974-8577  
DOI: 10.57639/SIRA.INTR0203

## Abstract

The umbrella vault of the castle in Sondrio, with its frescoes dated back to the 16th century, presents several aspects requiring to be investigated through different competences. On one hand, the stratigraphic interpretation of the wing of the building hosting the vault, inserted in a articulated system of volumes that from defensive fortress changed its function along the time, on the other one the definition of its geometrical characteristics, presenting signs of disruption, required a study in depth of the structure from a multidisciplinary point of view. The relationship among the authors of this “plot” took origin through the analysis of this masonry vault, despite its assessment presented several limits. The direct inspection of the structure was indeed difficult, due to its displacement, the artistic relevance of the decorations and the accessibility of the extrados. Thus, a clear relationship between the observed damages and the composing building techniques constituted an issue.

The complementary investigations here presented show the development of that knowledge path characterizing all the efforts addressed to conservation of the architectural heritage. The advanced geometrical survey, used for the crack pattern and the structural analysis, supported also the implementation of numerical models able to provide reliable verifications on the damage development, according to the vulnerabilities of the constructive system.

## Keywords

Masegra Castle; Umbrella Vault; HBIM; Crack Pattern; Soil Settlements; NURBS Modelling

## Introduzione

I sistemi voltati in muratura costituiscono da sempre una delle componenti di più difficile interpretazione dal punto di vista del comportamento strutturale. Nel rapporto che lega il campo del restauro architettonico alle verifiche strutturali<sup>1</sup>, il ricorso al calcolo fondato sugli elementi finiti è ampiamente documentato e ritenuto affidabile se applicato ad elementi facilmente semplificabili e quindi caratterizzati da forme geometriche regolari e composte da unità materiali facilmente riconducibili ad unità discrete. Per le volte semplici e per quelle composte, è possibile fare riferimento a diversi autori che, partendo dall'arco in muratura come unità fondamentale di questi elementi curvilinei, forniscono le regole empiriche per valutare l'insorgere di eventuali problemi di natura meccanica. Se le volte composte presentano poi una certa complessità, con una geometria anche irregolare, è oggi opinione condivisa che il ricorso a metodi fondati sul calcolo ad elementi finiti non garantisce i risultati più affidabili.

Volendo raffinare i controlli di sicurezza su queste strutture, sono comunque in corso diverse ricerche per la modellazione numerica di volte in muratura aventi anche geometrie molto complesse. Questo è il caso della volta ad ombrello della torre colombaia di Castel Masegra. Il complesso, composto da vari corpi di fabbrica costruiti e soprattutto modificati nel corso dei secoli (FIG. 01), è stato oggetto di un'importante campagna di restauro articolata in diversi lotti tra la fine degli anni Novanta del secolo scorso, il 2013 e il 2019. Oltre al recupero delle strutture e alla loro rifunzionalizzazione, dopo essere stato impiegato come caserma militare fino agli anni Ottanta dello scorso secolo, alcuni ambienti del castello hanno svelato

## Introduction

Masonry vaulted systems have always been one of the most difficult building components to be interpreted from the point of view of their structural behavior<sup>1</sup>. Starting from the link between the field of architectural restoration and structural monitoring, the use of the finite elements is widely documented and considered reliable when applied to elements that are easy to simplify, thus characterized by regular geometry and composed of uniform material units. In the case of simple and composed vaults, several references are available, from the static of the arch as fundamental unit of these winding elements, providing the empirical rules for evaluating the risk connected to mechanical problems. If the composed vaults present a certain complexity, with an irregular geometry, it is well known that methods founded on finite elements cannot guarantee reliable results.

Several research works concerning the numerical modeling of masonry vaults with complex geometry are under analysis, intending to refine the safety control of those structures. This is the case of the umbrella vault of the dovecote tower in Masegra Castle. The complex, composed of different wings, built and modified over the centuries (FIG. 01), was subjected to an important restoration campaign, articulated at the end of the last decade of the 20<sup>th</sup> century, 2013 and 2019. Besides the recovery and the reuse of the structures, after being used as a military barracks until the 80s of the last century, frescoes were discovered in some areas of the castle, dating back to the 16<sup>th</sup> century, when the castle was converted from a defensive structure into a noble residence. Among them, the fresco cycle containing episodes coming from the Orlando Furioso, at the intrados of the umbrella vault of the so-called *camera picta*, presenting a strong con-



**01**

Ripresa di Castel Masegra effettuata tramite sorvolo con drone (foto L. Barazzetti, 2016).  
 Sky view of Masegra Castle obtained by drone (picture by L. Barazzetti, 2016).



la presenza di affreschi risalenti al XVI secolo, quando il complesso fu convertito da fortezza a residenza gentilizia. Tra questi, il ciclo di affreschi con scene riferite all'Orlando Furioso, presenti all'intradosso della volta ad ombrello della cosiddetta *camera picta*, hanno mostrato uno stretto legame con altre architetture coeve del territorio valtellinese che avevano adottato la stessa iconografia sia nei saloni interni che sui prospetti esterni.

Gli autori hanno preso parte allo studio di questa volta complessa in muratura, raccogliendo informazioni sulla sua origine, sulle caratteristiche geometriche e costruttive, con l'obiettivo di approfondirne le proprietà meccaniche alla luce di un quadro fessurativo molto diffuso che preludeva a delle vulnerabilità che avrebbero potuto manifestarsi con l'attivazione di alcuni cinematismi. Per fare questo, la metodologia di analisi è stata sviluppata mediante le seguenti azioni:

- a) Analisi storica;
- b) Rilievo avanzato del manufatto;
- c) Analisi materico-patologica;
- d) Interpretazione del quadro fessurativo;
- e) Modellazione NURBS dei cinematismi di collasso della struttura.

Il modello geometrico tridimensionale dell'intero complesso costituisce uno dei risultati più rilevanti per l'impostazione del modello di gestione del piano di conservazione preventiva e programmata dell'edificio, nonché una piattaforma a supporto dei restauratori che hanno operato sulle decorazioni artistiche e che dovranno in futuro tornare ad occuparsi degli affreschi. Sulla base di questa accurata ricostruzione geometrica tridimensionale, gli autori hanno

nection with other coeval architectures in Valtellina territory showing the same iconographic scenes, both in internal rooms and on external facades.

The authors worked on the analysis of this complex masonry vault, collecting information on its origin, on the geometrical and constructive characteristics, with the aim of focusing on its mechanical properties, considering a diffused crack pattern that foreboded to vulnerability problems, which could become dangerous after the activation of certain cinematics. The study methodology was developed as follows:

- a) Historical analysis;
- b) Advanced survey of the building;
- c) Material and decay analysis;
- d) Crack pattern interpretation;
- e) NURBS modeling of the collapse mechanisms of the structure.

The 3D geometrical model of the entire complex constitutes one of the most relevant results for the setting of the preventive and planned conservation design of the building, and a platform supporting the experts involved in the restoration practice that worked on the artistic decorations and that will have to deal with them in the future. Using this accurate geometrical reconstruction, the authors tried to plot the results matured until now with the structural control of the umbrella vault, for investigating its mechanical properties and verify the evolution of the damages, considering the next opening to the public of this area, now restricted to guided visits during short periods.

After observing the appearance of a diffused crack pattern that is insisting on one of the four walls supporting the vault, caused by a soil settlement, the control of the struc-

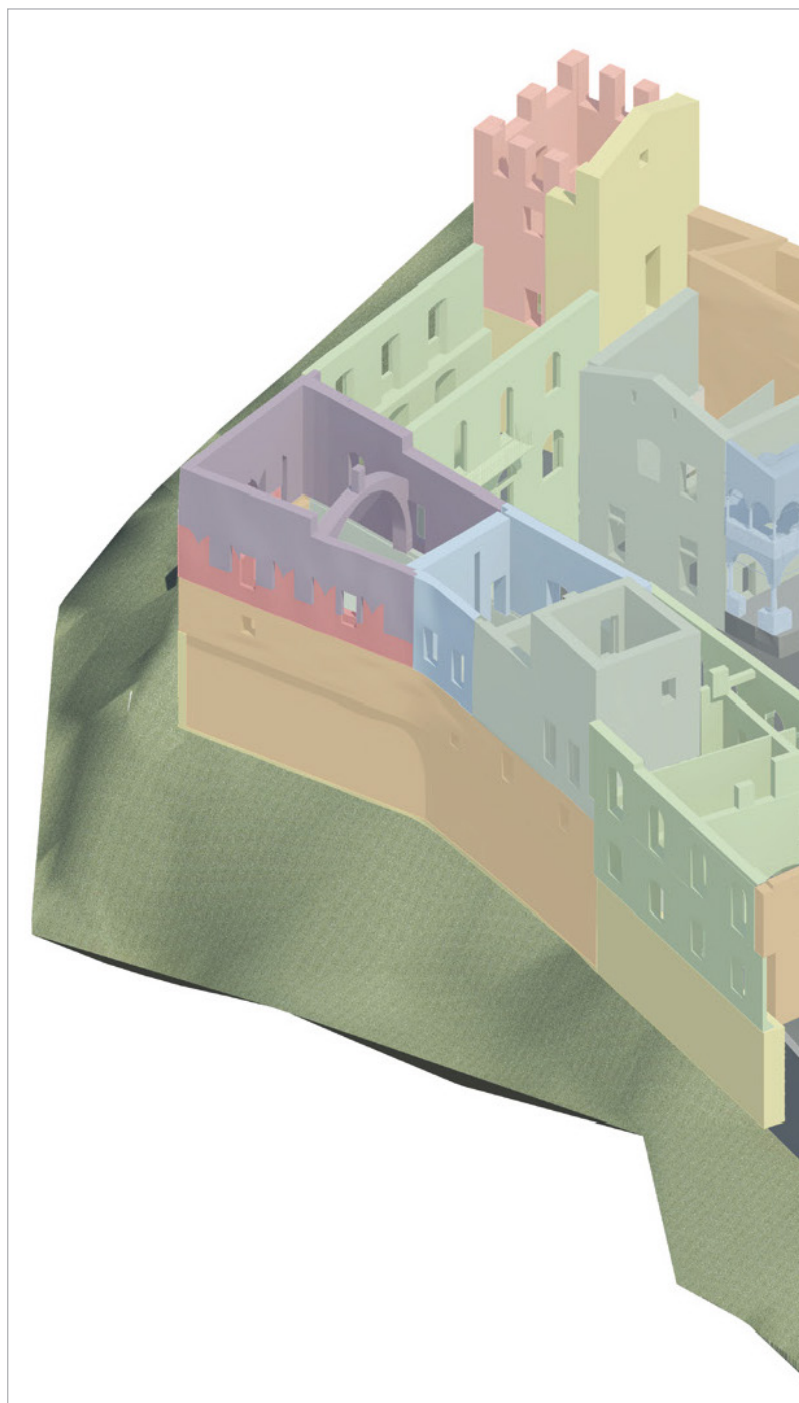
anche provato ad intrecciare i risultati fino ad ora maturati con la verifica strutturale della volta ad ombrello, per indagarne le proprietà meccaniche e verificare l'evoluzione del danno in previsione di una prossima apertura al pubblico di questa porzione dell'edificio, che è ancora limitata alle visite guidate in poche occasioni all'anno.

Dopo aver osservato l'insorgere di un quadro fessurativo che interessa prevalentemente una delle quattro pareti in muratura su cui insiste la volta, imputabile ad un cedimento differenziare, la verifica della sicurezza strutturale di questo elemento è stata affidata alla implementazione di un modello numerico sviluppato attraverso le superfici NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) del modello geometrico tridimensionale creato in Rhinoceros. In questo modo è stato possibile acquisire la geometria reale dell'elemento indagato, caratterizzato da diverse irregolarità nelle proporzioni delle sue unità di base, senza correre il rischio di semplificarne eccessivamente le forme. L'aderenza al dato geometrico reale era uno dei presupposti per sviluppare l'analisi strutturale tenendo conto della posizione delle fessure rilevate anche all'intradosso della volta, in modo da verificare l'affidabilità del codice sperimentale sviluppato da uno degli autori con il dato realmente visibile.

### Cenni storici sull'evoluzione del complesso di Castel Masegra

Il complesso di castel Masegra, uno degli antichi castelli che contraddistinguevano l'abitato di Sondrio, subì quattro radicali trasformazioni nel corso della sua esistenza: a) dapprima semplice roccaforte, tra XIII e XIV secolo fu progressivamente potenziato per assolvere alla sua funzione difensiva, b) per venire poi convertito in residenza gentilizia a partire dal XV secolo, fino all'aggiunta di nuovi corpi di fabbrica con funzioni residenziali nel corso del XVI secolo, c) arrivando ad essere convertito in struttura agricola sul finire del Cinquecento, quando la Valtellina fu assoggettata al dominio dei Grigioni, d) fino alla reintroduzione della funzione militare con l'arrivo di Napoleone all'inizio del XIX secolo. Un'interpretazione delle fasi costruttive è riportata in **FIGURA 02**.

Inizialmente documentato come roccaforte militare di origine medievale, potrebbe aver avuto origine da uno degli antichi "castrum" che in virtù di alcuni riscontri archeologici caratterizzavano un ampio territorio prima che la città si consolidasse nel suo attuale centro storico<sup>2</sup>. Un primo importante rinnovamento di questa struttura fortificata è documentato tra gli anni 1040 e 1048, quando con Alberto De Capitanei venne affidata alla sua famiglia la sicurezza della città<sup>3</sup>. Dopo essere stato distrutto da un incendio che gli studiosi collocano tra il 1292 e il 1318, i De Capitanei ripararono l'edificio nel 1331, in vista delle incursioni da parte dei Visconti di Milano che assoggettarono la città nel 1367. Un generale rinnovo del complesso fu iniziato nel 1413, con il consenso del duca di Milano, ad opera di



**02**  
Ricostruzione dell'evoluzione storica del complesso (foto D. Oreni, 2016).  
*Layout of the historical evolution of the complex (picture by D. Oreni, 2016).*



Francesco De Capitanei che vi introdusse nuovi corpi di fabbrica in linea con le esigenze delle corti gentilizie del periodo rinascimentale<sup>4</sup>. L'opera fu poi continuata a partire dal 1436 dai nuovi proprietari, i Beccaria, a cui si deve l'introduzione del loggiato e la riconfigurazione di alcuni spazi esistenti.

La *camera picta* collocata lungo il lato sud della collina, al piano primo della torre detta colombaia (FIG. 03), risale appunto al XVI secolo e il ciclo di affreschi che ospita, ispirati ad alcuni episodi tratti dall'*Orlando Furioso*, voleva

tural safety of this element was assigned to the implementation of a numerical model developed through NURBS (Non-Uniform Rational Bezier Spline) surfaces obtained by the HBIM survey. Thus, the real geometry of the investigated element was acquired, characterized by different irregularities in the proportions of its base units, avoiding the risk of an excess of simplification of its shapes. The adherence to the real geometrical data was the one of the premises for developing the structural analysis considering the displacement of the cracks surveyed at the intrados of the vault. The



**03**

Vista della torre colombaia lungo il lato sud del castello (foto D. Oreni, 2016).

*View of the dovecote tower along the south side of the complex (picture by D. Oreni, 2016).*

**04**

La camera picta di Castel Masegra con la volta ad ombrello affrescata (foto L. Cantini, 2019).

*The camera picta in Masegra Castle with the frescoed vault (picture by L. Cantini, 2019).*

celebrare le origini della famiglia che si perdono nel mito: i Capitanei vantavano infatti una leggendaria discendenza dal cugino di Orlando, Viviano, e così i Beccaria intendevano legittimare la loro discendenza e il loro subentro ai precedenti proprietari del castello dopo le nozze di Jacopina de Capitanei con Antonio Beccaria. Si tratta di un corpo di fabbrica nella manica sud del complesso edilizio. Il piccolo spazio a pianta quadrata della *camera picta* doveva essere un locale privato, coperto dalla volta a ombrello decorata con affreschi (FIG. 04) che riprendevano alcune scene dal romanzo di Ludovico Ariosto pubblicato nel 1516. Le 16 campiture della volta ad ombrello sono state decorate con motivi che riproducono l'effetto le cornici in pietra finemente modanate. Tra di loro, si aprono tondi semplici o polilobati nei quali sono collocate 8 scene riprese dal romanzo. Altre scene, tre per lato, sono poi riportate all'interno delle lunette che prendono forma dall'incontro della volta con le quattro pareti che delimitano la stanza. Lungo le pareti sono stati riportati alla luce diversi motivi geometrici che decoravano questo ambiente.

Lo stato di conservazione degli affreschi è decisamente compromesso, ma dopo i restauri e un attento studio iconografico, è stato osservato che le scene si riferiscono ai primi 8 canti dell'Orlando Furioso, con una chiara aderenza alle incisioni eseguite da Gabriele Giolito de' Ferrari, a corredo della versione illustrata dell'opera, pubblicate nel 1542<sup>5</sup>. Nei quadrilobi si riconoscono così le illustrazioni che aprivano i primi quattro episodi del poema: la fuga di Angelica mentre è in corso il duello tra Rinaldo e Ferrau; il colloquio tra Rinaldo e Sacripante e l'incontro tra Angelica e l'eremita; la profezia di Melissa fatta all'eroica Bradamante; la sfida tra Bradamante e il mago Atlante a cavallo dell'ippogrifo. I quattro tondi che si alternano ai quadrilobi della volta sembrano riprodurre invece dei paesaggi difficilmente riconoscibili. Le quattro scene succes-

aim was to evaluate its reliability according to the experimental code developed by one of the authors, comparing it with the visible data.

### Short notes on the historical evolution of the Masegra Castle

The Masegra Castle, one of the ancient fortresses characterizing the area of Sondrio, underwent four transformations along its existence: a) simple stronghold, between the 13<sup>th</sup> and 14<sup>th</sup> century was progressively reinforced to improve its defensive function; b) later changed into a noble residence since 15<sup>th</sup> century, until the addition of the new wings in the 16<sup>th</sup> century; c) converted into an agricultural structure towards the end of the century, when the Valtellina was submitted to the domain of the Grisons; d) until the reintroduction of the military function with the arrival of Napoleon at the beginning of the 19<sup>th</sup> century. A short interpretation of the building phases is visible in FIGURE 02.

Initially documented as a military citadel realized in mediaeval period, the castle could come from one of the ancient "castrum" that, according to archaeological evidences, characterized a wide area before the formation of the city center<sup>2</sup>. A first important renewal of this fortified structure was documented between 1040 and 1048, when Alberto De Capitanei and his family received the task of defending the city<sup>3</sup>. After being damaged by a fire, indicated by the expert around 1292 and 1318, the De Capitanei family repaired the building in 1331, before the raids of the Visconti from Milan that took the city in 1367. A general property transformation began in 1413, with the consent of the Duke of Milan, by Francesco De Capitanei who added new bodies characterized by style of the Renaissance courts<sup>4</sup>. The renewal was carried on by the new owner in 1436, the Beccaria family, who introduced the loggia and the reconfiguration of some of the existing spaces.



sive sono invece collocate nelle lunette formate dalla volta sulle pareti verticali: il re di scozia che assiste all'uccisione del duca Polisseno; l'arrivo di Ruggiero sull'isola di Alcina; il duello tra Ruggiero ed Erifilla; la fuga di Ruggiero dal castello di Alcina; lo scontro tra Ruggiero ed uno dei suoi servitori. Nella FIGURA 05 viene proposto un parallelo tra gli affreschi restaurati e le incisioni di Giolito.

Questo interessante ciclo decorativo fu compromesso dalla generale imbiancatura data a muri e soffitti quando il complesso venne convertito in caserma, nonché da alcuni dissesti statici, che produssero diverse fessurazioni su volte e pareti, la cui natura richiedeva di essere indagata con maggiore attenzione. La determinazione dello spessore della volta costituiva però un limite oggettivo. Non esistendo un sistema di collegamento verticale permanente per raggiungere il piano al di sopra della *camera picta*, adibito in origine a ricovero per i colombi, anche l'impiego di indagini strumentali, come le prove radar, non risultavano di facile utilizzo, data la delicatezza delle decorazioni poste all'intradosso e l'accessibilità limitata al piano superiore.

Tali limiti furono in parte superati mediante l'uso complementare di diverse informazioni. Uno studio comparativo fatto sulle strutture voltate di epoca rinascimentale dell'area tra Como e Sondrio indicava l'impiego del laterizio per le volte già dal tardo medioevo<sup>5</sup>. La possibilità di osservare in un altro edificio coevo una volta ad ombrello con mattoni disposti a coltello ha costituito un ulteriore indizio per

The *camera picta*, placed on the first floor of the dovecote tower (FIG. 03), is dated back to the 16<sup>th</sup> century with its frescoes cycle, inspired by some episodes from the poem Orlando Furioso, was created to celebrate the origin of the family lost in the myth: the De Capitanei boasted a legendary descent from Orlando's cousin, Viviano, and the Beccari family wanted to legitimate their blood and their succession to the previous owner of the castle after the wedding of Jacopina De Capitanei with Antonio Beccaria. It is part of a body located in the south wing of the building. The small room with the square plant of the *camera picta* should be a private space, covered by the umbrella vault decorated with the frescoes (FIG. 04), recalling some scenes from Ariosto's poem published in 1516. The 16 painted groins of the umbrella vault were decorated with motives reproducing stone moldings between the ribs, painted tondos with simple and polylobed shapes where the eight scenes from the romance are displayed. Other scenes, three on each side, are reported into the lunettes on the walls. Along the walls other traces of geometrical decorative motives were discovered.

The state of conservation of the frescos is quite compromised, but after the restoration works and a detail iconographic study of the subjects it was observed that the scenes are referred to the first eight cantos of the Orlando Furioso, with a clear adherence to the prints realized by Gabriele Giolito de' Ferrari for illustrating the poem published in 1542<sup>5</sup>. Into the quatrefoils are represented the illustrations



integrare le informazioni ottenute dal rilievo geometrico della struttura al livello del suo intradosso.

### Il rilievo della *camera picta* con l'ausilio di tecniche evolute

Come precedentemente sottolineato, le operazioni di rilievo geometrico della volta ad ombrello di Castel Masegra sono state parte di una attività di documentazione digitale più ampia, che ha dapprima riguardato la restituzione tridimensionale dell'intero castello (alla scala 1:50) e solo successivamente l'acquisizione di informazioni geometriche ad un livello di dettaglio più elevato per alcuni elementi architettonici. La complessità geometrica e le dimensioni di Castel Masegra hanno reso indispensabile l'uso delle moderne tecniche di acquisizione di dati, in grado di catturare la forma dei diversi elementi architettonici tramite nuvole dense di punti che discretizzano le superfici degli oggetti. Tali tecniche, ormai consolidate per quanto riguarda gli aspetti di acquisizione sul campo e processamento preliminare, comprendono dati da strumentazione laser scanning terrestre, immagini digitali riprese con fotocamere calibrate, da terra e da drone, e misurazioni topografiche finalizzate alla materializzazione di un sistema di riferimento stabile nel tempo<sup>7</sup>.

È però importante ribadire che, nonostante le tecniche impiegate possano fornire dati con precisione metrica di pochi millimetri, ogni attività di rilievo presenta difficoltà proprie che spesso non consentono poi la restituzione completa solo utilizzando dati digitali, soprattutto nel caso

that opened the first four episodes of the poem: Angelica's escape during the duel between Rinaldo and Ferrau; the talk between Rinaldo and Sacripante and the meeting between Angelica and the hermit; Melissa's prophecy to the heroic Bradamante; the challenge between Bradamante and Atlante riding a hippogriff. The four tondos alternating between the quatrefoils of the vault report painted landscapes that are not easily recognizable. The further four scenes are reported in the lunettes originated by the vault on the vertical walls: the king of Scotland watching the killing of duke Polisseno; Ruggero's arrival on the Alcina island; the duel between Ruggero and Erifilla; Ruggero's escape from the Alcina castle; the fight between Ruggero and one of his servants. **FIGURE 05** shows a confrontation between the restored frescoes and the Giolito's drawings.

This important decoration was compromised by the general whitewashing given to walls and ceilings when the complex was converted into a military barrack, as well as by some structural failure that gave rise to various cracks on the vault and the walls requiring a detailed investigation. The identification of the thickness of the vault was one of the issues. Due to the lack of a permanent vertical connection between the level of the *camera picta* and the upper floor, originally used as pigeons' shelter, even the recourse to instrumental investigations, like radar tests, showed several limits, due to the fragility of the decorations on the intrados and the difficult accessibility to the upper level.

The complementary use of different information allowed at overpassing those limits. A comparative study realized on

## 05

Confronto tra le otto scene affrescate nei quadrilobi e nelle lunette della volta con le incisioni di Giolito del 1542 (foto di D. Oreni, 2016).

*Comparison among the eight scenes in the quatrefoils and in the lunettes with the drawings published by Giolito in 1542 (picture by D. Oreni, 2016).*

## 06

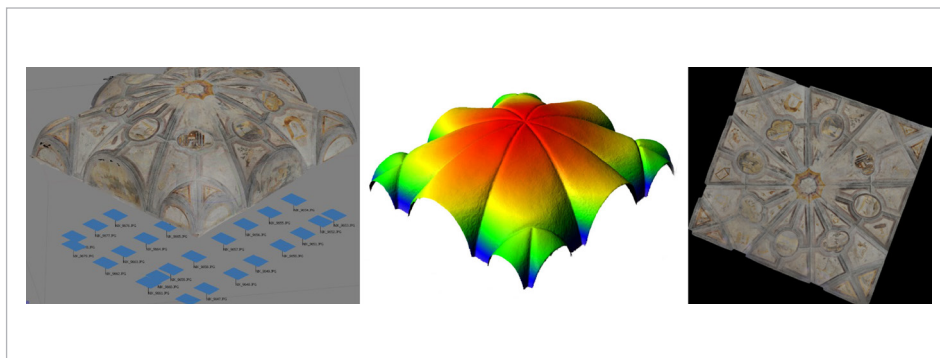
Fasi di elaborazione della nuvola di punti e generazione del modello geometrico della volta ad ombrello (immagine di D. Oreni, 2016).

*Elaboration phases of the point cloud and generation of the geometrical model of the umbrella vault (image by D. Oreni, 2016).*

## 07

Ricostruzione della superficie affrescata della volta mediante fotogrammetria (immagine di L. Barazzetti, 2016).

*Deconstruction of the frescoed surface through photogrammetric technique (image by L. Barazzetti, 2016).*



di complessi di grandi dimensioni come il Castello. Una serie di integrazioni mirate è spesso necessaria al fine di colmare i vari “vuoti” causati dalle zone non raggiungibili oppure da occlusioni di vario tipo, giungendo in modo progressivo al completamento della ricostruzione. In tal senso, l’aggiunta di ulteriori immagini, scansioni laser, oppure misure con un più tradizionale rilievo diretto, non possono che risultare sempre necessarie<sup>8</sup>.

Nel caso specifico della volta ad ombrello, dopo aver ripreso e registrato i dati laser scanner (FIG. 06) con il supporto di una serie di punti di appoggio da rilievo topografico (per il collegamento dei locali posti ai vari livelli della torre), la ricostruzione digitale è stata spinta ad una scala superiore ad 1:10 con un progetto fotogrammetrico delle superfici affrescate, generando un modello 3D con *texture* digitale e l’ortofoto dell’intradosso con risoluzione sub-millimetrica<sup>9</sup> (FIG. 07). La misura di punti di appoggio ha consentito la registrazione del modello fotogrammetrico nello stesso sistema di riferimento delle nuvole di punti laser scanner con un errore inferiore a 3mm.

A partire da questi dati accurati di rilievo, è stato possibile leggere e restituire graficamente, con rappresentazioni bi-tridimensionali, l’esatta geometria di questa forma complessa al fine di indagarne la genesi costruttiva e poter elaborare un modello interoperabile HBIM che potesse essere anche impiegato per la redazione del piano di conservazione preventiva e programmata, introdotto a conclusione dei lavori di restauro.

Dal punto di vista geometrico, la volta ad ombrello a sesto

the vaulted structures from Renaissance age of the area between Como and Sondrio showed that the bricks were used since the late Middle Ages<sup>6</sup>. Moreover, the possibility to inspect a coeval building presenting an umbrella vault characterized by rowlock bricks constituted additional evidence for integrating the available information obtained by the geometrical survey realized on the intrados of the structure.

### The survey of the *camera picta* by using advanced techniques

As previously mentioned, the digital documentation of the umbrella vault of Castel Masegra was part of a broader digital documentation activity, which concerned the three-dimensional reconstruction of the entire castle (scale 1:50) after the acquisition of geometric information at a higher level of detail for some architectural elements. The geometric complexity and size of Castel Masegra required modern data acquisition techniques, which can capture the shape of the various architectural elements through dense point clouds that discretize the surfaces. These techniques include data from terrestrial laser scanners, digital images taken with calibrated cameras (using drones or at the ground level, i.e. terrestrial photogrammetry), and measurements to materialize a permanent reference system<sup>7</sup>.

An important consideration deserves to be mentioned. Although digital tools can provide data with a metric precision of a few millimeters, each surveying activity presents its own difficulties and problems. A complete reconstruction only based on digital data is rarely achievable, especially in the



ribassato è composta da otto unghie regolari, impostate su otto archi a tutto sesto; essendo la stanza di forma quadrangolare, quattro lunette d'angolo consentono di ottenere una volta ad ombrello impostata su pianta ottagonale. Dal punto di vista costruttivo si tratta quindi di una volta composita, a crociera, formata da otto unghie, il cui peso viene scaricato, in maniera puntiforme, in corrispondenza degli spigoli tra un'unghia e l'altra. È la decorazione pittorica a fingere la presenza di costoloni negli spigoli, così come di una ulteriore suddivisione delle singole unghie in due elementi, cosa non rilevabile leggendo le geometrie della struttura; analogamente per quanto riguarda la decorazione delle lunette, in realtà composte da mezza volte a crociera, impostate ciascuna su due archi posti in corrispondenza dei quattro angoli della stanza.

La comprensione dell'esatta geometria degli elementi che compongono la volta ad ombrello, al di là di quella che è l'immagine determinata dalle campiture pittoriche, ha consentito di formulare una serie di osservazioni sulla sua genesi costruttiva e sulla tessitura muraria delle unghie, da considerarsi come base di partenza fondamentale per analizzare il quadro fessurativo.

### Il restauro della camera picta

La superficie affrescata della volta è stata oggetto di una intensa attività di restauro nell'ultima decade del secolo scorso dal 1996 al 1998, quando le porzioni superstiti della decorazione furono pulite mediante diverse azioni di tipo meccanico e chimico, previo preconsolidamento. Per la reintegrazione delle molte lacune, non si impiegò la tecnica del rigatino, ma venne preferita la stesura di colori con tonalità intermedie tra quelle ancora in opera. Per riparare le discontinuità prodotte dalle molte fessure comparse sia all'intradosso della volta che sulle pareti in muratura, si fece ricorso alle stuccature, che tutt'oggi permettono di leggere con chiarezza l'andamento del quadro fessurativo che caratterizzava i vari elementi. Il recupero dei pochi resti dell'apparato decorativo presente sui muri della sala risale invece al 2013, quando per dare corso alla

case of large complexes such as the Castle. Integrations are often necessary to fill the various "gaps" caused by unreachable areas or by occlusions of various types, progressively completing the reconstruction. Additional images, laser scans, or measurements with more traditional direct survey methods are always necessary<sup>8</sup>.

In the case of the umbrella vault, after taking laser scanning data (FIG. 06) and registering point clouds on a set of control points, the level of detail of the digital reconstruction was enhanced to a scale better than 1:10. Such work required a photogrammetric project of the frescoed surfaces, generating a 3D model with digital texture and the orthophoto of the intrados with a sub-millimetric resolution<sup>9</sup> (FIG. 07). The use of control points allowed the registration of the photogrammetric model in the same reference system of the laser scanner point, achieving a precision better than 3mm.

Starting from these accurate survey data, it was possible to observe and graphically represent, with two-three dimensional drawings and models, the exact geometry of this complex form, to investigate its construction genesis and to be able to elaborate an interoperable HBIM model. Model that could also be used for the drafting of the preventive and programmed conservation plan, introduced at the conclusion of the restoration activities.

From a geometric point of view, the depressed arch umbrella vault is composed of eight regular parts (groins) set on eight round arches; since the room is quadrangular in shape, four corner lunettes make it possible to obtain an umbrella vault set on an octagonal plan. From a constructive point of view, it is therefore a composite, cross vault formed by eight groins, the loads of which has a point distribution, at the corners between one groin and the next. It is the pictorial decoration that fakes the presence of ribs in the corners, as well as a further subdivision of the individual groins into two elements, something that cannot be detected by observing the geometry of the structure; similarly, regarding the decoration of the lunettes, which actually are composed of half cross vaults, each set on two arches placed at the four corners of the room.



## 08

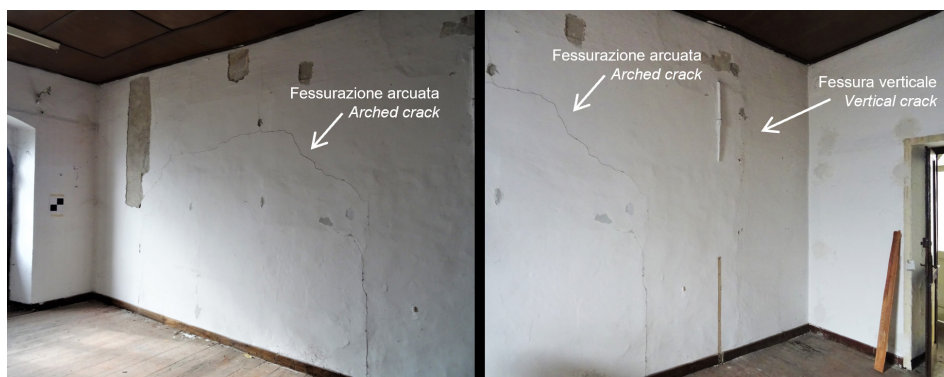
Dettagli delle fessurazioni risarcite degli architravi delle aperture al di sotto della volta (foto di L. Cantini, 2019).

*Details of the cracks observed in the architraves of the openings under the vault (picture by L. Cantini, 2019).*

## 09

Dettagli delle fessurazioni osservate sul lato opposto della parete est della camera picta (immagine di L. Cantini, 2019).

*Details of the cracks observed on the back side of the east wall of the camera picta (picture by L. Cantini, 2019).*



rifunzionalizzazione del castello con il progetto del Museo della Montagna furono rimossi alcuni tamponamenti dalle aperture che collegavano la “sala picta” agli ambienti circostanti, permettendo il ritrovamento di decorazioni di cui si ignorava l’esistenza.

## Interpretazione del quadro fessurativo e dei dissesti statici della struttura

Dall’osservazione delle principali ristilature messe in opera per riparare le fessure è possibile notare come quelle più estese interessassero gli archi al di sopra delle aperture e come da questi le fessure si propagassero agli spigoli delle lunette soprastanti (FIG. 08). Sulla volta, le fessure attraversano trasversalmente alcuni dei costoloni, mettendo in evidenza la separazione tra le unità fondamentali riconducibili alle sequenze di archi paralleli che costituiscono le 8 unghie ad essi appoggiati. Più singolare risulta invece la concentrazione di fessure in prossimità degli spigoli della volta: queste avevano un andamento tendenzialmente parallelo a quello dei costoloni diagonali.

Sulla parete est, alcune delle fessure si sono riaperte e sul lato opposto del muro è possibile osservare una fessurazione molto estesa al centro della stanza, il cui andamento ad arco (FIG. 09) richiama un problema di dissesto connesso ai cedimenti differenziali del terreno. In base alla letteratura sull’argomento, che riprende dei modelli desunti dall’esperienza empirica, il problema sembra dipendere da un cedimento di tipo centrale. Dall’analisi storica è noto che quest’ala del complesso fu fondata su dei corpi di fabbrica preesistenti, risalenti al XV secolo e successivamente modificati fino al XIX secolo<sup>10</sup>. Proprio l’aggiunta delle strutture del portico monumentale in adiacenza alla muratura del lato est della torre colombaia<sup>11</sup> potrebbe aver dato origine a questo cedimento, all’origine del dissesto analizzato con il rilievo del quadro fessurativo (FIG. 10).

## Analisi cinematica dei dissesti della volta

Lo scopo delle analisi qui presentate è fornire un’interpretazione numerica al quadro fessurativo osservato sulla vol-

Understanding the exact geometry of the elements that composed the umbrella vault, beyond the image determined by the pictorial layer, has made it possible to formulate a series of observations on its constructive genesis and on the wall texture of the groins, to be considered as a fundamental starting point for analyzing the crack pattern.

## The restoration interventions of the camera picta

The fresco surface of the vault was the object of an important restoration from 1996 and 1998, when the survived portions of the decorations were cleaned through different mechanical and chemical techniques, upon pre-strengthening intervention. Rather than applying the *rigatino* technique for repairing the various lacunas of the paintings, it was preferred the use of a color balanced among the existing chromatic tones. The discontinuities produced by the various cracks, appeared at the intrados of the vault and on the masonry walls, were repaired through repointing, allowing at maintaining the recognizability of the crack pattern characterizing the different elements. In 2013 the rests of the decorative apparatus reported on the walls was discovered, when some curtain walls closing previous openings between the *camera picta* and the surrounding rooms were removed according to the introduction of the new functions set by the project for the Mountains Museum.

## Interpretation of the crack pattern and the structural failures

Observing the development of the main repointed cracks, the most extended ones were concentrated on the arches on the openings, arriving at the edges of the overlaying lunettes (FIG. 08). On the vault, several cracks are crossing the groins transversally, marking the separation between the fundamental units of the structure, referable to the sequence composed by the parallel arches constituting the 16 spherical wedges. Other cracks are concentrated at the corners of the vault, with a development following the direction of the diagonal groins.



ta. Avendo a disposizione un modello HBIM, è stato possibile condurre un'analisi cinematica per valutare la risposta strutturale della volta a cedimenti differenziali dei punti di appoggio. In accordo con la trattazione della muratura come materiale di tipo *no-tension* (quindi, idealizzato come infinitamente rigido, non reagente a trazione, e nel quale si escludono collassi alla compressione ed al taglio) presentata in origine da Heyman (1966), il problema trova spazio nel contesto della teoria dei problemi di contatto monolatero<sup>12</sup>.

In questa sede si è dunque utilizzata un'analisi limite computazionale di tipo cinematico, applicata in precedenza su altre strutture voltate in muratura<sup>13</sup>. Il metodo utilizza una discretizzazione della volta in un numero ridotto di elementi rigidi, supposti infinitamente resistenti, in cui il distacco viene ammesso solo alle interfacce tra blocchi adiacenti. Il cedimento differenziale agli appoggi viene inserito tramite un vincolo di tipo cinematico applicato ai bordi esterni degli elementi perimetrali. Ne deriva un problema di programmazione lineare, la cui soluzione è il campo di spostamento che allo stesso tempo rispetta il vincolo cinematico al bordo esterno e minimizza il lavoro compiuto dalle forze esterne all'atto del collasso<sup>14</sup>.

L'utilizzo di un modello geometrico basato su funzioni parametriche NURBS<sup>15</sup> risulta particolarmente utile in quanto consente di seguire una discretizzazione che, pur utilizzando pochi elementi rigidi, mantiene inalterata la

On the east wall, some repaired cracks are now open back and on the opposite side there is a large crack at the center of the room, presenting an arched shape development (FIG. 09) that recalls a failure mechanism connected to soil settlements. According to the literature on this issue, based on empirical models, the problem seems to be connected to a central soil settlement. The historical analysis indicates that this wing of the complex was founded on pre-existing, dated back to the 15<sup>th</sup> century and further modified until the 19<sup>th</sup> century<sup>10</sup>. The realization of the large cloister in proximity of the east wall of the dovecote tower<sup>11</sup> could be the origin of the subsidence with the development of the surveyed crack pattern (FIG. 10).

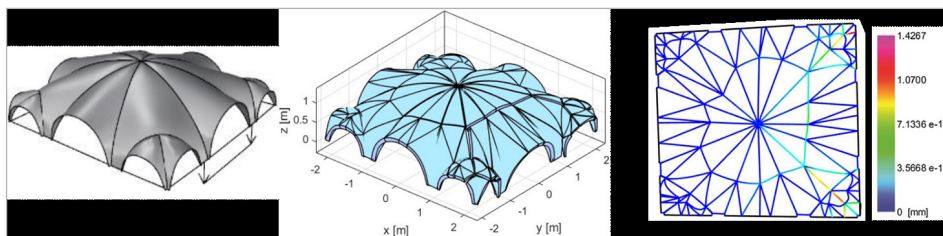
### Settlement analysis via kinematic approach

The scope of the analyses here presented is to provide a numerical interpretation to the crack pattern observed on the umbrella vault. Starting from the HBIM model, a kinematic analysis has been applied to identify the structural response under differential settlements in the supports. According to the idealization of masonry as *no-tension* material (infinitely rigid, with null tensile strength, and with crushing and sliding failures excluded) originally presented by Heyman (1966), the problem can be treated within the theory of the unilateral contact problem<sup>12</sup>.

Therefore, a computational limit analysis tool based on the kinematic theorem, already applied to masonry vaults<sup>13</sup>, has

### 10

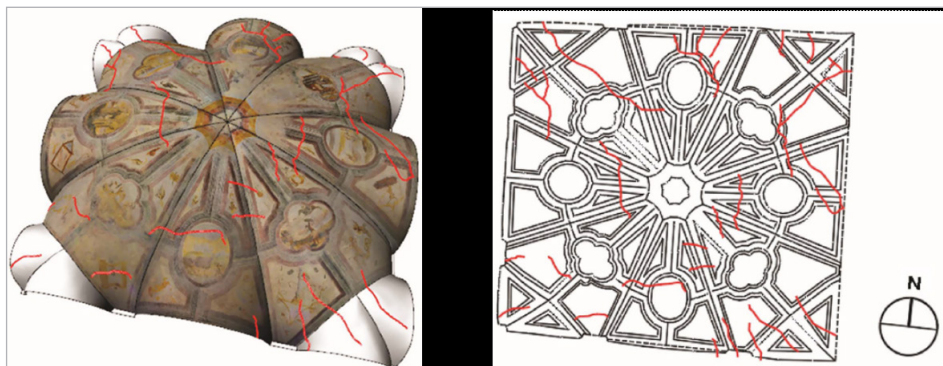
Analisi del quadro fessurativo della camera picta (immagini di L. Cantini, 2019).  
Crack pattern analysis of the camera picta (image by L. Cantini, 2019).



### 11

Ipotesi di cedimento di tipo centrale sul lato est della volta, modello NURBS in configurazione deformata e corrispondente quadro fessurativo (immagine di N. Grillanda, 2019).

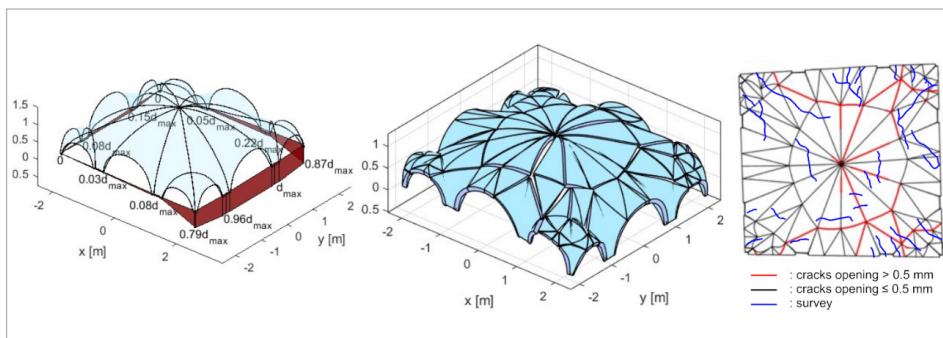
Hypothesis of central settlement on the east side of the vault, NURBS model in deformed configuration and corresponding crack pattern (image by N. Grillanda, 2019).



### 12

Modello tridimensionale e vista in proiezione della volta con il quadro fessurativo rilevato (immagine di N. Grillanda, 2019).

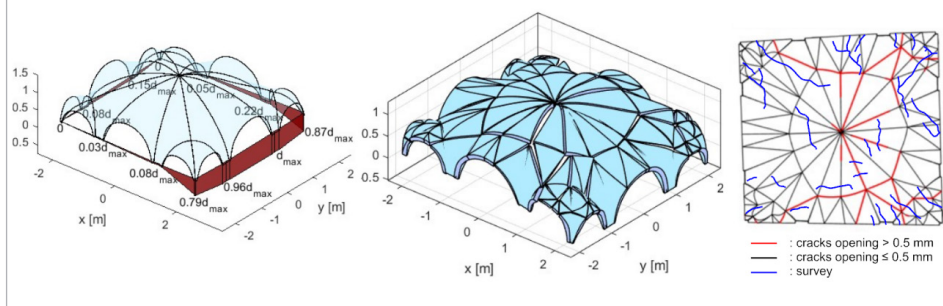
3D model and projection of the vault with the surveyed crack pattern (image by N. Grillanda, 2019).



### 13

Configurazione di cedimento ottenuta tramite analisi inversa, corrispondenti modello NURBS in configurazione deformata e quadro fessurativo (immagine di N. Grillanda, 2019).

Settlement shape obtained through inverse analysis, corresponding NURBS model in deformed configuration and crack pattern (image by N. Grillanda, 2019).



geometria originale della superficie curva. Tuttavia, l'ipotesi che il cinematiso avvenga in termini di roto-traslazioni mutue tra elementi rigidi adiacenti rende il risultato fortemente dipendente dalla mesh iniziale, in particolare dalle poche interfacce presenti (essendo queste le uniche zone in cui sono ammessi distacchi). Per determinare la corretta posizione delle linee di frattura e di conseguenza la forma del cinematiso di collasso con buona approssimazione, si adatta progressivamente la discretizzazione iniziale mediante un algoritmo di ottimizzazione di tipo genetico<sup>16</sup>. Questa strategia di ottimizzazione metaeuristica si è dimostrata efficace nella valutazione del comportamento a collasso di volte in muratura<sup>17</sup>, a patto di utilizzare una discretizzazione iniziale adeguata alla rappresentazione dei quadri fessurativi tipici delle volte storiche<sup>18</sup>.

## Analisi numerica e interpretazione del danno

L'analisi limite di tipo cinematico è stata inizialmente utilizzata per determinare il meccanismo di collasso associato ad un preassegnato cedimento differenziale, in particolare un cedimento di tipo centrale sul lato perimetrale est. Il

been followed. This method is based on a discretization of the vault in a few rigid elements, supposed infinitely resistant, in which the detachment is allowed only along interfaces between adjacent blocks. The differential settlement in the supports is modeled through a kinematic constraint imposed at the external boundaries of the perimeter elements. A linear programming problem, whose solution is the displacement field that minimizes the external work at the collapse with respect to the kinematic constraint on the external boundary, is derived<sup>14</sup>.

The use of a geometrical model based on NURBS parametric functions<sup>15</sup> is particularly suited here, since it permits a discretization that maintains unaltered the actual geometry of the curved surface despite using a few rigid elements. However, by assuming a mechanism described by mutual roto-translation between adjacent rigid elements, the result strongly depends on the initial mesh, in particular on the position of the few interfaces (displacement jumps can occur here only). To define the correct position of the fracture lines and consequently the shape of the collapse mechanism, the initial mesh is progressively adjusted by a genetic algorithm<sup>16</sup>. This metaheuristic optimization strategy has proved

risultato ottenuto viene presentato di seguito. Il campo di spostamento ottenuto interessa principalmente gli elementi posti sul versante est della volta, con distacchi visibili all'interno delle vele ed in corrispondenza delle volte a crociera in angolo; non si osservano spostamenti sul versante ovest (FIG. 11).

Pur presentando diverse similitudini, il quadro di danno osservato in sito risulta maggiormente diffuso sull'intera struttura, indice quindi di un cedimento più complesso che può includere minori spostamenti anche sugli altri lati perimetrali. La valutazione di questo particolare cedimento ha richiesto un'analisi inversa: l'analisi limite cinematica è stata dunque utilizzata al fine di determinare quale cedimento differenziale è associato alla configurazione di danno nota (FIG. 12).

Riportato nella FIGURA 13, il risultato ottenuto presenta un cedimento verticale lungo tutto il versante est con un valore di picco al centro del lato perimetrale. Questo risulta in ottimo accordo con l'ipotesi iniziale. Anche se di entità inferiore, si sono ottenuti abbassamenti anche sui punti di appoggio sui lati nord e sud. A questa particolare forma del cedimento risulta associato un campo di spostamento che interessa tutte le vele della volta, situazione che presenta diverse analogie con la configurazione di danno reale. Il confronto tra le due è presentato in figura 13. In conclusione, si può affermare che l'analisi inversa ha fornito una buona interpretazione dello stato di danno, che risulta attendibile in base della letteratura tecnica ed all'esperienza empirica, e compatibile con l'analisi storica dell'edificio.

## Conclusioni

Nell'ambito della visione sistemica che contraddistingue il piano di conservazione, gli autori hanno preso in esame un caso che presentava le condizioni ottimali per impiegare quella interoperabilità che caratterizza il progetto di restauro per assicurare un controllo costante su uno degli elementi più delicati dell'intero complesso: la volta ad ombrello con decorazioni rinascimentali. L'opera presenta infatti caratteristiche costruttive molto peculiari, con una geometria complessa e tracce di un quadro fessurativo diffuso ora riparato ma ancora intellegibile. L'adozione di tecniche laser scanner associate alla fotogrammetria hanno permesso di comprendere con precisione il sistema costruttivo della volta, con il vantaggio di poter impiegare il rilievo avanzato per interpretare la natura del dissesto presente sia all'intradosso che sulle pareti della *camera picta*. Gli approfondimenti diagnostici sviluppati durante il cantiere di restauro, unitamente ad altre attività di controllo previste per l'implementazione del progetto di riuso del complesso, avevano inoltre dimostrato che parte della torre colombaia venne fondata su materiali di riporto, a differenza di altre porzioni dell'ex complesso fortificato.

Lo studio presentato mira a salvaguardare il patrimonio artistico, gli affreschi rinascimentali, e quello architetto-

to be effective in the evaluating the collapse behavior of masonry vaults<sup>17</sup>, provided that the initial discretization takes into account the crack pattern typical of historical vaults<sup>18</sup>.

## Numerical analyses and damage interpretation

The kinematic limit analysis was first used to determine the collapse mechanism associated with a pre-assigned differential settlement, in particular a central settlement on the east perimeter side. The obtained result is presented in figure 11. The displacement field involves mainly the elements on the east side of the vault, with openings visible within the sails and on the cross vaults located in the corners. No displacements are observed on the west side (FIG. 11).

Despite the similarities with the actual damage pattern, the real cracks are more diffused on the whole structure. This suggests the idea of a more complex settlement, with lower displacements also along the other perimeter sides. The assessment of this settlement required an inverse analysis. Thus, the kinematic limit analysis has been used to identify the shape of the differential settlement associated with the actual crack pattern (FIG. 12).

The obtained result, see FIGURE 13, includes a vertical settlement of the east side with a peak value in the middle. This supports the initial hypothesis. Some lower vertical displacements have been found along the north and south sides also. The displacement field associated with this settlement configuration involves all the elements of the vaults, and this is in good agreement with the actual damage. A comparison between numeric and real crack pattern is presented in figure 13. In conclusion, the inverse analysis provided a good interpretation of the damage state, which agrees with the data from technical literature and empirical experience and compatible with the historical evolution of the building.

## Conclusions

Among the systemic vision informing the conservation plan, the authors examined a case-study presenting the necessary data to access those interoperability aspects characterizing the restoration design for providing a permanent monitoring on one of the most sensitive elements of the building: the umbrella vault with its Renaissance decorations. This vault presents unique building characteristics, with a complex geometry and the traces of a diffused crack pattern now repaired but still comprehensible. The use of laser scanning and photogrammetric techniques allowed the interpretation of the crack pattern visible on the vault and on the supporting walls of the *camera picta*. The investigations tests carried out during the restoration works, together with the other monitoring activities provided for implementing the reuse project of the complex, showed that part of the dovecote tower was founded on fill land, different than other areas of the ex-fortified complex.

The present study is addressed to the protection of the artistic, the Renaissance frescoes, and the architectural heritage,

nico, una volta in muratura con una tipologia composta che mostra delle specificità uniche. Di fronte ad un quadro fessurativo ancora limitato a poche unità strutturali, riconducibile al problema della subsidenza del terreno, è stato approfondito l'aspetto della sicurezza strutturale della volta. La conservazione delle tracce dei precedenti dissesti ha permesso di intraprendere l'elaborazione di una simulazione del danno che poteva essere verificata dalla reale distribuzione delle fessurazioni sulla struttura. L'impiego di modelli agli elementi finiti per simulare il comportamento meccanico delle strutture presenta sempre alcuni gradi di incertezza quando si è costretti a semplificare elementi architettonici dotati di una certa complessità. Per la volta ad ombrello di Castel Masegra, la ricostruzione geometrica estremamente raffinata della struttura ha permesso di impostare un modello fondato sulle proprietà dimensionali delle varie unghie e lunette che compongono questo elemento. L'analisi inversa così impostata ha tenuto conto proprio di quelle dinamiche di danno osservate sulle murature della torre, fornendo una previsione del possibile dissesto a cui si andrebbe in contro se il cedimento dovesse progredire nel tempo. Il coinvolgendo di competenze che vanno dalla topografia, alla scienza delle costruzioni, passando dall'analisi storica e delle tecniche costruttive, si inserisce nella logica dell'interdisciplinarietà promossa dal piano di conservazione, per il quale ogni elemento è soggetto a diverse letture, che ne mettono in luce qualità specifiche o vulnerabilità che richiedono l'impiego di soluzioni strategiche. L'obiettivo è quindi quello di rispettare l'integrità dell'elemento storico favorendo la comprensione delle cause dei problemi a cui è soggetto per garantire il ricorso ad un minimo intervento, prima che la situazione possa essere troppo grave, e dover quindi introdurre soluzioni invasive che potrebbero comprometterne la corretta conservazione.

a masonry vault presenting a composed typology characterized by unique properties. Considering that the observed crack pattern is limited to some structural units, referable to a problem activated by the soil settlement, the structural safety of the vault was assumed as an issue. The conservation of the pattern left by the previous cracks was used as a data input for implementing the simulation of the damage that can be referenced to the real disruption signs visible on the vault. The finite elements used for simulating the mechanical behavior of the structures presents some uncertainties, when the simplification of the complex elements of a building is too high. In the case of the umbrella vault in Masegra Castle, the refine geometrical reconstruction of its structure allowed the realization of a model based on the real dimensions of the various grains and lunettes forming the element. The inverse analysis was set considering the real damages observed on the walls of the tower, providing a prevision of the possible disruption of the structure due to the increasing of the effects coming from the soil settlement. The involvement of different competences, from topography to structural design, passing through historical and building techniques analyses, corresponds to the logic of the interdisciplinarity promoted by the conservation plan, indicating each element as interpretable by different readings, able at highlighting specific qualities or vulnerabilities which may require the setting of strategic solutions. The aim is the respect of the integrity of the historical element, encouraging the comprehension of the causes of the problems it is subjected, to guarantee the resort to the minimum intervention, before the situation can drive to a worsening implying the use of invasive solutions which could compromise the proper conservation of the built heritage.

## Note/Notes

- \_1 Di Pasquale 2003; Benvenuto 2010.
- \_2 Mariotti 1994; Della Misericordia 2006; Rao 2015.
- \_3 D'Alfonso 2013.
- \_4 Gavazzi 2002; Gavazzi,

- Corbellini 2004.
- \_5 Caneparo 2011, pp. 395-422.
- \_6 Della Torre, Cantini 2022, pp. 21-38.
- \_7 Barazzetti *et al.* 2015a.
- \_8 Barazzetti *et al.* 2015b.

- \_9 Barazzetti *et al.* 2018.
- \_10 D'Alfonso 2013, pp. 277-279.
- \_11 Bonetti, Perlini 2013.
- \_12 Como 2013a.
- \_13 Chiozzi, Milani, Tralli 2017.

- \_14 Tralli *et al.* 2020.
- \_15 Piegl, Tiller 1995.
- \_16 Haupt, Haupt 1998.
- \_17 Grillanda, Chiozzi, Milani 2020.
- \_18 Como 2013b.

## Bibliografia/Bibliography

- Barazzetti et al. 2015a: L. Barazzetti, F. Banfi, R. Brumana, G. Gusmeroli, M. Previtali, G. Schiantarelli, *Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans*, in «Simulation Modelling Practice and Theory», 57 (2015a), pp. 71-87. doi: 10.1016/j.simpat.2015.06.004.
- Barazzetti et al. 2015b: L. Barazzetti, F. Banfi, R. Brumana, M. Previtali. *Creation of Parametric BIM Objects from Point Clouds Using Nurbs*, in «The Photogrammetric Record», 30, 152 (2015b), pp. 339-362. doi: 10.1111/phor.12122.
- Barazzetti et al. 2018: L. Barazzetti, R. Brumana, S. Della Torre, G. Gusmeroli, G. Schiantarelli, *Point clouds turned into finite elements: the umbrella vault of Castel Masegra*, Atti IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, 364 012087. doi: 10.1088/1757-899X/364/1/012087.
- Bonetti, Perlini 2013: L. Bonetti, S. Perlini, *Masegra. Storia del castello di Sondrio*, Tipografia Bettini, Sondrio 2013.
- Caneparo 2011: F. Caneparo, *Ariosto valtellinese: entrelacement fra palazzi, ville e castelli*, in L. Bolzoni, S. Pizzini, G. Rizzabelli (a cura di), «Tra mille carte vive ancora» *Ricezione del Furioso tra immagini e parole*, Maria Pacini Fazzi editore, Lucca 2011, pp. 395-422.
- Chiozzi, Milani, Tralli 2017: A. Chiozzi, G. Milani, A. Tralli, *A Genetic Algorithm NURBS-based new approach for fast kinematic limit analysis of masonry vaults*, in «Computers and Structures», 182 (2017), pp. 187-204. doi: 10.1016/j.compstruc.2016.11.003.
- Como 2013a: M. Como, *Settlement response of masonry constructions*, in *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites*, London, Taylor & Francis Group, 2013a, pp. 265-272.
- Como 2013b: M. Como, *Statics of Historic Masonry Constructions*, Springer Series in Solid and Structural Mechanics, Springer, Berlin, Heidelberg 2013b. doi: 10.1007/978-3-642-30132-2.
- D'Alfonso 2013: A. D'Alfonso, *Sondrio, Castel Masegra. Sito protostorico e strutture medievali*, in «Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Lombardia», 2013, pp. 277-279.
- Della Misericordia 2006: M. Della Misericordia, *Divenire comunità. Comuni rurali, poteri locali, identità sociali e territoriali in Valtellina e nella montagna lombarda nel tardo Medioevo*, Unicopli, Milano 2006.
- Della Torre, Cantini 2022: S. Della Torre, L. Cantini, *Historical review of masonry arches and vaults. Trends in Historic Preservation and the Relevance of Understanding Curved Masonry Structures*, in G. Milani, V. Sarhosis (a cura di), *From Corbel Arches to Double Curvature Vaults. Research for Development*, Springer, Cham 2022, pp. 21-38.
- Di Pasquale 2003: S. Di Pasquale, *L'arte del costruire. Tra conoscenza e scienza*, Marsilio, Venezia 2003.
- Grillanda, Chiozzi, Milani 2020: N. Grillanda, A. Chiozzi, G. Milani, *Efficient meta-heuristic mesh adaptation strategies for NURBS-based upper-bound limit analysis of general curved three-dimensional masonry structures*, in «Computers & Structures», (2020), 234,106271. doi: 10.1016/j.compstruc.2020.106271.
- Haupt, Haupt 1998: R.L. Haupt, S.E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*, John Wiley & Sons, New York 1998.
- Heyman 1966: J. Heyman, *The stone skeleton*, in «International Journal of Solids and Structures», 2, 2 (1966), pp. 249-279. doi: 10.1016/0020-7683(66)90018-7.
- Mariotti 1994: V. Mariotti, *Sondrio. Centro storico*, in «Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Lombardia», (1994), pp. 222-223.
- Piegl, Tiller 1995: L. Piegl, W. Tiller, *The NURBS Book*, Springer, Berlin 1995. doi: 10.1007/978-3-642-59223-2.
- Rao 2015: R. Rao, *I castelli della Valtellina nei secoli centrali del Medioevo (X-XII): Habitat fortificato, paesaggi e dinamiche di popolamento*, in «La Valtellina nei secoli. Studi e ricerche archeologiche», volume I: Saggi, SAP Società Archeologica, Mantova 2015, pp. 195-212.
- Tralli et al. 2020: A. Tralli, A. Chiozzi, N. Grillanda, G. Milani, *Masonry structures in the presence of foundation settlements and unilateral contact problems*, in «International Journal of Solids and Structures», 191-192 (2020), pp. 187-201. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2019.12.005.

