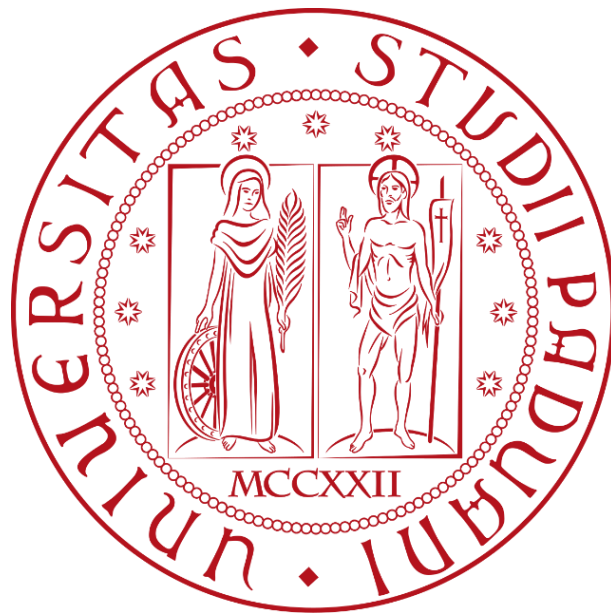


# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale – DICEA**

*Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

*Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile*



**TESI DI LAUREA TRIENNALE**

**Utilizzo di dati fotogrammetrici terrestri multitemporali per il  
monitoraggio di quadri fessurativi di edifici**

*Multitemporal terrestrial photogrammetric data for cracks monitoring of  
buildings*

Relatore: Prof. Massimo Fabris

Laureando: Marco Maso

**A.A. 2022-2023**

**Utilizzo di dati fotogrammetrici terrestri multitemporali per il monitoraggio di quadri fessurativi di edifici**

*Multitemporal terrestrial photogrammetric data for cracks monitoring of buildings*

Tesi di Laurea Triennale

Anno Accademico 2022-2023

*Di*

Maso Marco

# INDICE

<b>Introduzione</b> .....	1
<b>Capitolo 1 – I movimenti franosi nell’area di Rovegliana</b> .....	2
1.1 – Movimenti franosi .....	2
1.2 – Indice di frana .....	3
1.3 – Inquadramento territoriale .....	6
1.4 – Relazione tra movimenti franosi e edifici .....	7
<b>Capitolo 2 – Fotogrammetria</b> .....	9
2.1 – Introduzione alla fotogrammetria .....	9
2.2 – Principi base della fotogrammetria .....	10
2.3 – Le equazioni di collinearità .....	13
2.4 – I parametri di orientamento .....	17
2.5 – Modalità di orientamento esterno .....	18
<b>Capitolo 3 – Elaborazione dei dati fotogrammetrici</b> .....	21
3.1 – Dati .....	21
3.2 – Elaborazione delle ortofoto .....	24
3.3 – Analisi dei risultati .....	30
3.3.1 – Chiesa a Rovegliana .....	31
3.4 – Conclusioni .....	34
<b>Bibliografia e Sitografia</b> .....	34
<b>Appendice A</b> .....	35

# Introduzione

L'obiettivo principale di questa tesi è lo studio del quadro fessurativo di due edifici situati a Rovegliana, frazione del comune di Recoaro Terme (VI), e della sua variazione nel corso di due anni. L'origine delle crepe risale ad un movimento franoso che ha colpito la zona e messo in pericolo la stabilità degli edifici circostanti.

Il comune di Recoaro Terme è noto per la sua particolare posizione geografica, caratterizzata da una forte instabilità del terreno. Negli ultimi anni, infatti, la zona è stata colpita da una serie di eventi franosi causati principalmente da una combinazione di fattori naturali e antropici. Questi fenomeni hanno messo in evidenza la necessità di approfondire la conoscenza del territorio e di adottare misure di prevenzione efficaci.

Il presente studio si avvale dell'utilizzo della fotogrammetria terrestre come strumento per l'analisi delle fessurazioni in oggetto. Questa metodologia di rilievo permette di ottenere da immagini fotogrammetriche o ortofoto dettagli riguardanti le fessure e le loro variazioni con accuratezza.

Lo scopo di questa analisi è quello di individuare in che modo e quanto gravemente si sono evolute le fessurazioni d'interesse, in modo da poter fornire indicazioni utili sulla stabilità degli edifici, sulla dinamica del fenomeno franoso e sulle possibili cause di tale variazione.

# Capitolo 1

## I MOVIMENTI FRANOSI NELL'AREA DI ROVEGLIANA

### 1.1 – *Movimenti franosi*

I fenomeni franosi sono eventi di varie tipologie e dimensioni che si verificano quando una massa di terreno perde stabilità e si muove lungo un pendio. Questi eventi possono essere causati da molteplici fattori, come la pioggia, l'attività sismica, la rimozione della vegetazione o la costruzione di opere di ingegneria. I movimenti franosi possono verificarsi anche in molteplici ambienti, dalla montagna alle zone costiere, e possono provocare danni alle infrastrutture e alle proprietà, nonché causare gravi conseguenze per la sicurezza delle persone.

Le principali tipologie di frane, riportate in Figura 1, includono:

1. Frana da crollo roccioso: si verifica quando una roccia cade dalla sua posizione originaria, spesso a causa di erosione o dell'azione del vento;
2. Frana per ribaltamento: è una variante del crollo roccioso, ma la caduta dei massi avviene in avanti e con traiettoria curva;
3. Frana per scivolamento: viene definita da parti del terreno che scivolano lungo superfici inclinate con strati argillosi imbevuti d'acqua o con superfici di faglia;
4. Frana per smottamento: sono frane di ridotte dimensioni, che interessano solo la copertura detritica superficiale incoerente, come le argille;
5. Frane da scoscendimento: sono discese di materiali rocciosi con movimenti rotazionali, lungo superfici di frattura concave verso l'alto;
6. Frane da colamento o "*Debris Flow*": sono movimenti su superfici molto estese di masse argillose imbibite d'acqua in seguito a forti piogge. Lungo i versanti si possono verificare, oltre alle frane vere e proprie, movimenti molto più lenti, ma continui detti soliflussi, che provocano un colamento lungo versanti, anche poco ripidi, di strati argillosi o detritici resi più mobili per l'assorbimento di grandi quantità d'acqua. L'acqua, non potendo penetrare in profondità, fa scivolare lo strato detritico;
7. Il "*soil creep*" o reptazione: lento movimento dei detriti superficiali, però più veloce degli strati sottostanti, dovuto a contrazioni e dilatazioni per sbalzi termici, gelo e disgelo, organismi, che producono lo scivolamento verso il basso;

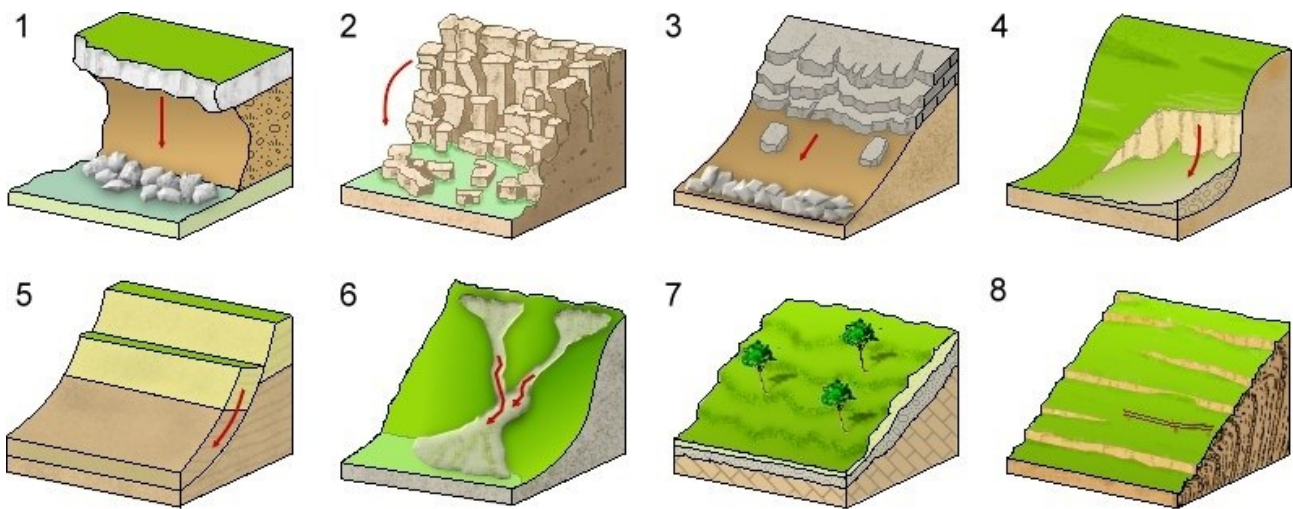


Figura 1: Principali tipologie di frane;

Ogni tipo di frana ha caratteristiche specifiche che dipendono dal tipo di terreno coinvolto, dalla pendenza del versante e dalle condizioni meteorologiche.

## 1.2 – *Indice di frana*

L'indice di frana, noto anche come indice di suscettibilità alle frane (ISF), è una misura quantitativa dell'attitudine di una determinata area ad essere interessata da fenomeni franosi. Permette di esprimere la probabilità che un'area specifica possa subire un evento franoso in seguito a determinate condizioni ambientali, geologiche e antropiche.

L'ISF viene calcolato sulla base di diverse variabili, tra cui la pendenza del terreno, la geologia, l'uso del suolo, la vegetazione, la presenza di corsi d'acqua, la tipologia delle rocce, la tipologia dei terreni e l'attività antropica. Ognuna di queste variabili viene ponderata in base alla sua rilevanza nell'indurre o favorire un fenomeno franoso.

Viene utilizzato principalmente per la pianificazione territoriale e per la prevenzione dei rischi da frana. In particolare, consente di identificare le aree a maggiore rischio e di definire le misure di prevenzione e di protezione più appropriate, come ad esempio la realizzazione di opere di difesa idraulica, opere di ingegneria naturalistica o il ripristino della vegetazione.

È uno strumento fondamentale per la gestione dei rischi da frana e per la salvaguardia del territorio e della popolazione che lo abita.

Le regioni con il più alto indice di frana sono la Lombardia, Emilia-Romagna, Marche, Molise, Valle d'Aosta e Piemonte.

La zonazione della suscettibilità alle frane suddivide e classifica un territorio sulla base della propensione che lo stesso ha di produrre frane. Per la valutazione e per la realizzazione di carte di suscettibilità, si utilizzano diverse metodologie:

- Metodi diretti: si basano sulla mappatura diretta del territorio in settori a diverso ISF. Sono largamente soggettivi e difficilmente riproducibili;
- Metodi euristici: si basano su combinazioni qualitative di fattori ritenuti importanti per spiegare la distribuzione della franosità nel territorio. Presuppongono una conoscenza dettagliata delle relazioni tra la franosità e le caratteristiche del territorio stesso;
- Metodi statistici: si basano su tecniche e metodi statistici per classificare il territorio. Viene formulato un modello statistico sulla base che i fattori e le condizioni che hanno prodotto frane in passato potrebbero produrne anche in futuro. Le metodologie sono varie e si dimostrano particolarmente adatte a produrre modelli e zonazioni per territori molto vasti;
- Metodi deterministici: si basano sull'applicazione di semplici modelli fisici per spiegare la distribuzione geografica dei movimenti franosi. Sono tradizionalmente usati per definire zonazioni per aree di limitata estensione, ma possono anche essere utilizzati per aree più vaste.

Secondo i dati ricavati dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), ogni anno si verificano qualche centinaio di eventi di frana sul territorio nazionale causando vittime, feriti e danni a edifici, beni culturali e infrastrutture.

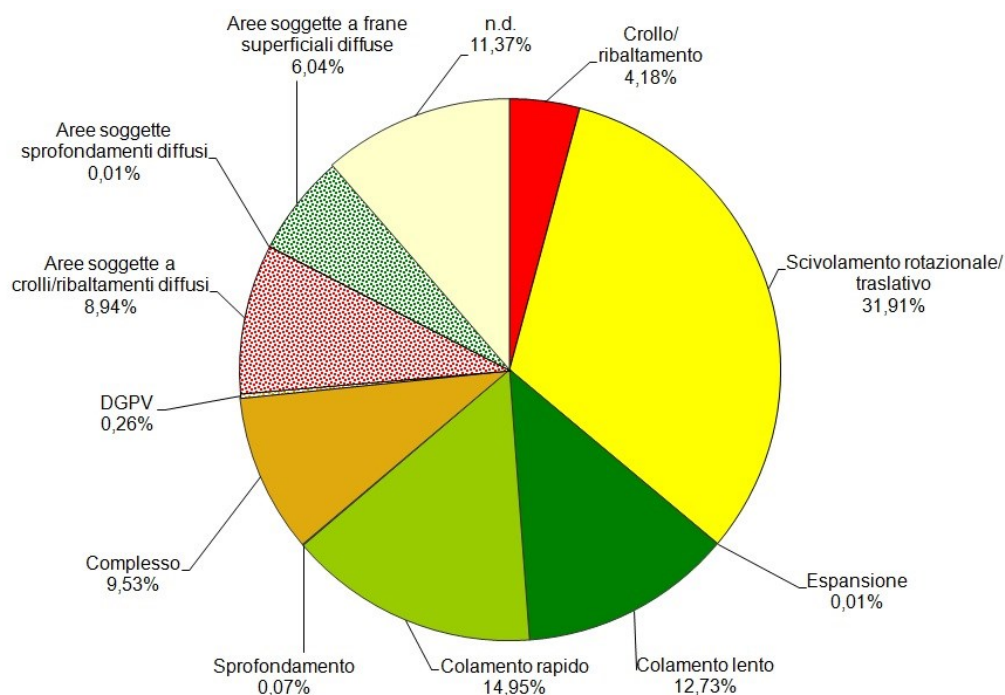


Figura 2: Distribuzione percentuale delle tipologie di movimento franoso; Fonte: Rapporto ISPRA, 356/2021;

Nella Figura 2 sono rappresentate le tipologie di movimento franoso che hanno interessato il territorio italiano secondo i dati raccolti dall'ISPRA. (122 eventi principali nel 2020, 220 nel 2019, 157 nel 2018, 172 nel 2017, 146 nel 2016, ecc.).

Un quadro sulla distribuzione delle frane nel territorio nazionale, ricavato sulla base dell'ISF, calcolato su maglia di lato 1 km è riportato in Figura 3.

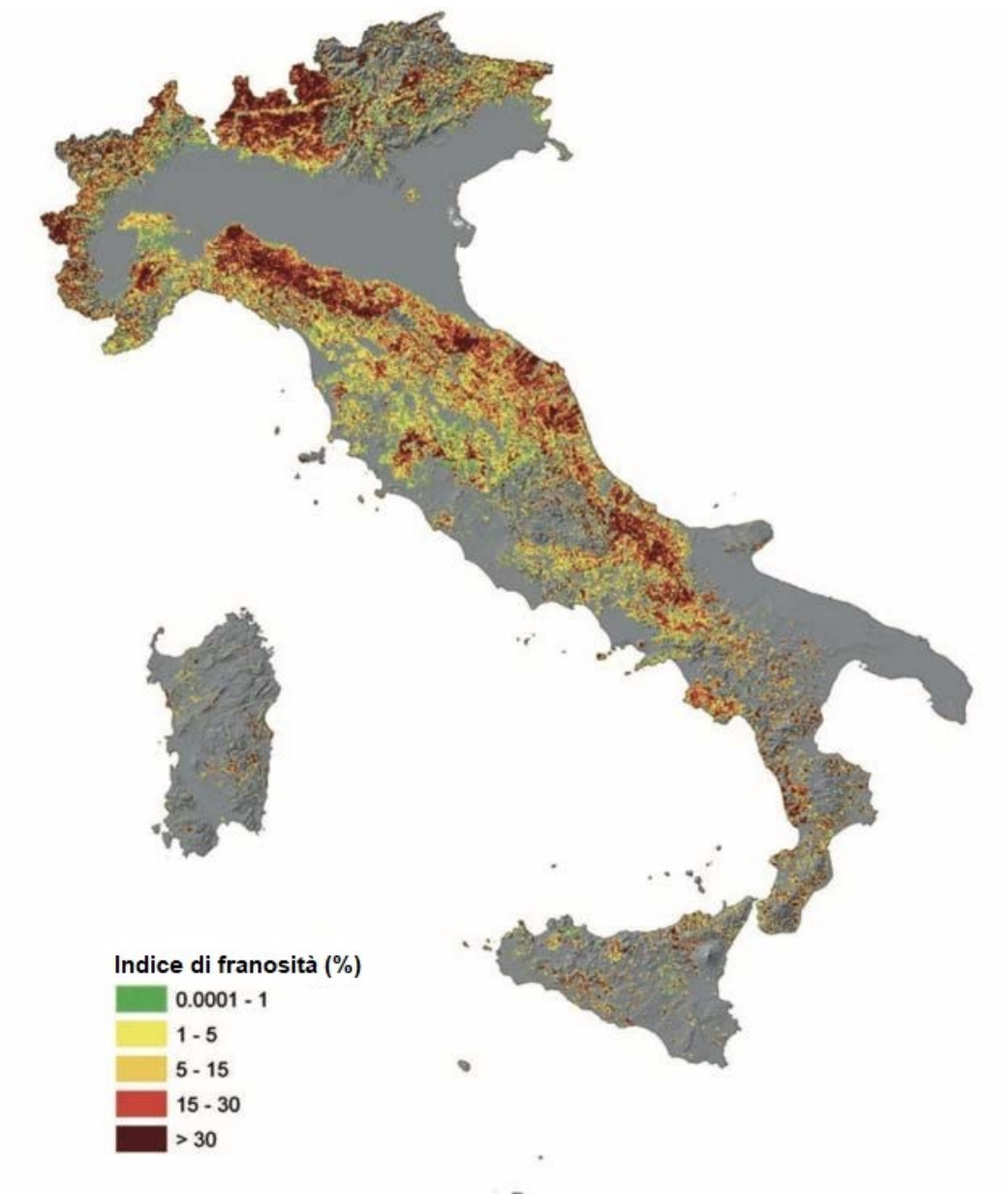


Figura 3: Densità di frane (area in frana/area cella) su maglia di lato 1 km; Fonte: Rapporto ISPRA, 356/2021;

### 1.3 – Inquadramento territoriale

La zona di interesse per lo studio del quadro fessurativo è Rovegliana, frazione del comune di Recoaro Terme (VI). Si trova ad un'altitudine di circa 800 metri sul livello del mare, su un versante delle Prealpi vicentine, a circa 6km dal centro di Recoaro Terme (Figura 4). Il territorio è noto per essere particolarmente soggetto a fenomeni franosi.

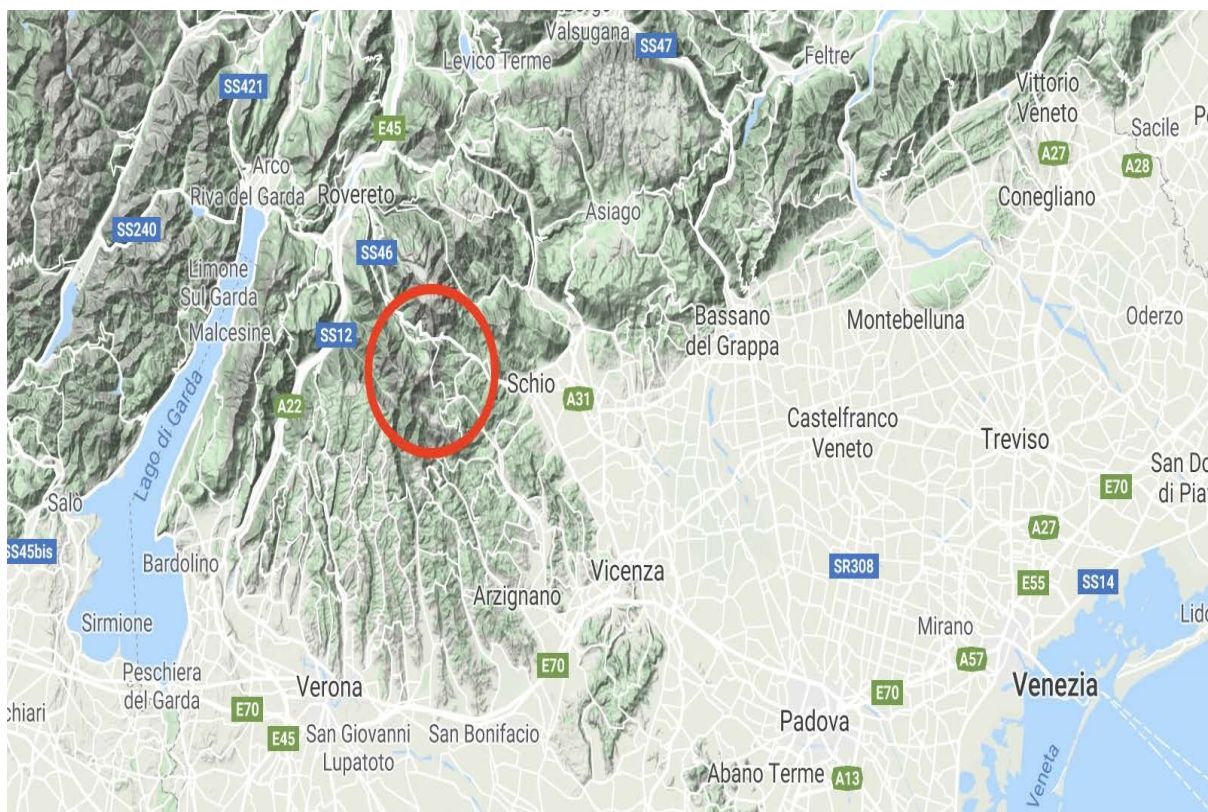


Figura 4: Cartografia generale della zona di Rovegliana;

Negli anni '90, la frazione di Rovegliana ha subito numerosi eventi franosi che hanno causato notevoli danni alle abitazioni e alla viabilità. Le frane che si sono verificate nella zona sono state principalmente di tipo rotazionale e colate di detriti. La situazione si è poi aggravata a partire dal 2002, quando una grossa frana rotazionale ha bloccato la strada provinciale SP28 che collega Recoaro Terme con Schio e Thiene, interrompendo i collegamenti tra le due vallate.

Uno degli episodi più recenti si è verificato nel 2018, quando un'abbondante pioggia ha causato il cedimento del terreno su cui erano costruite alcune abitazioni nella zona di Rovegliana. Il fenomeno ha provocato la frana di un costone di roccia e la successiva caduta di detriti sulla strada sottostante, impedendo il transito veicolare.

A causa della presenza di diverse faglie geologiche e della natura delle rocce presenti nel sottosuolo, la zona è considerata a rischio di frana. Infatti, nella zona si sono

verificate anche altre tipologie di frane, come la frana per scivolamento e la caduta di massi. Tutte legate alla particolare morfologia del territorio e dalle sue caratteristiche geologiche.

Nel corso degli anni, sono state attuate diverse misure di mitigazione del rischio di frana nella zona, tra cui il consolidamento del terreno, la costruzione di opere di contenimento e la realizzazione di sistemi di allerta e monitoraggio dei movimenti del terreno.

Nonostante queste misure, Roveglia continua a essere a rischio frana, e l'attenzione del comune e della popolazione locale rimane alta per prevenire il verificarsi di nuovi eventi.

#### **1.4 – *Relazione tra movimenti franosi e edifici***

I movimenti franosi possono causare gravi danni agli edifici, in particolare se si verificano su terreni instabili o con una forte pendenza. Gli effetti possono includere crepe, fessurazioni, distacchi di parti della struttura e addirittura anche il crollo dell'intero edificio. In Figura 5 viene riportata una di queste fessurazioni da una frana.



*Figura 5: Fessurazioni causate da frane;*

Per prevenire questi rischi, le autorità locali e regionali adottano misure di prevenzione, come la realizzazione di opere di consolidamento dei versanti, l'utilizzo di tecniche di ingegneria naturalistica e il monitoraggio costante del territorio.

Quando una frana colpisce un'area, può causare notevoli tensioni e movimenti del suolo, che a loro volta possono causare danni agli edifici limitrofi. In particolare, le fessurazioni nelle pareti delle strutture possono essere causate dal movimento del suolo al di sotto dell'edificio stesso.

Le fessure possono variare in dimensione e profondità, e possono comparire in diverse parti della struttura. Sono sintomo di un problema minore, come i normali movimenti di dilatazione della struttura, ma anche di un problema più serio, infatti, la presenza e l'evoluzione nel tempo di crepe potrebbe causare il cedimento strutturale dell'edificio.

In generale, la presenza di fessurazioni, soprattutto in zone con elevato ISF, richiede un'attenzione particolare e una valutazione accurata. Per mitigare i rischi è necessario il monitoraggio costante delle fessurazioni e l'adozione di adeguate misure di prevenzione.

# Capitolo 2

## FOTOGRAMMETRIA

### 2.1 – *Introduzione alla fotogrammetria*

La fotogrammetria può essere definita come quella tecnica di rilievo che permette di ottenere informazioni metriche tridimensionali di oggetti tramite l'acquisizione e l'analisi di immagini fotografiche degli stessi, ottenute da punti di vista differenti. Questa tecnica, utilizzata in architettura, topografia e cartografia, permette di effettuare il rilievo da remoto, direttamente sulle fotografie.

Rispetto ai rilievi effettuati direttamente in sito, offre diversi vantaggi:

- La determinazione delle caratteristiche metriche degli oggetti senza un contatto fisico diretto, e in tal senso può essere definita una sorta di “telerilevamento”;
- Il rilievo simultaneo di molti punti, ottenendo così una grande quantità di informazioni;
- La possibilità di effettuare le misurazioni a posteriori, ovvero successivamente al rilievo sul campo, quindi consentendone la ripetizione, la modifica, il controllo, ecc.

Il principio base su cui poggia è simile a quello che regola la vista umana: la nostra capacità di percepire una terza dimensione, definita profondità, deriva dal fatto che nel nostro sistema visivo vengono “eseguite” due fotografie da due punti differenti, ovvero i nostri occhi. Come nel nostro sistema di visione, nella fotogrammetria sono necessarie un numero minimo di due immagini, le quali devono essere acquisite da due punti di vista differenti. Viene definito “modello fotogrammetrico” la parte di sovrapposizione tra le due immagini nella quale possono essere applicati i principi fotogrammetrici.

Le principali forme della fotogrammetria sono quella terrestre e quella aerea.

La fotogrammetria aerea si realizza posizionando una camera fotogrammetrica all'interno di un aeroplano dotato di botola nella parte inferiore della carlinga. La camera viene alloggiata con l'obiettivo rivolto verso il basso, in quanto l'oggetto del rilievo è il territorio. Questa metodologia viene utilizzata per la produzione e l'aggiornamento di cartografia alle varie scale (da 1: 5000 a 1: 100000).

La fotogrammetria terrestre permette il rilievo metrico di oggetti attraverso la restituzione di modelli stereoscopici derivati da coppie di fotografie realizzate da fotocamere ubicate a terra. Generalmente una camera viene posizionata su un

treppiede con l'obiettivo rivolto verso l'oggetto del rilievo, normalmente perpendicolare all'asse delle quote del sistema di riferimento cartografico. Questa metodologia viene utilizzata soprattutto per rilievi riguardanti il monitoraggio di lesioni o deformazioni di opere ingegneristiche o architettoniche, rilievi di scavi archeologici e rilievi di oggetti difficilmente accessibili o disponibili per un tempo limitato con un livello di dettaglio molto elevato (scale da 1:500 a 1:1000), avendo distanza camera-oggetto limitata a 100 ÷ 300m.

## 2.2 – Principi base della fotogrammetria

L'immagine dell'oggetto di cui ci interessa il rilievo è una prospettiva centrale nella quale il centro di presa coincide con il centro dell'obiettivo della camera (*punto O*, Figura 6). Per ognuno dei punti dell'oggetto (punti *A, B, C*, Figura 6) è possibile individuare una retta che passa per il centro di presa della camera e che, proiettata sul piano immagine, definisce la posizione dei punti stessi sull'immagine (punti *a, b, c*, Figura 6).

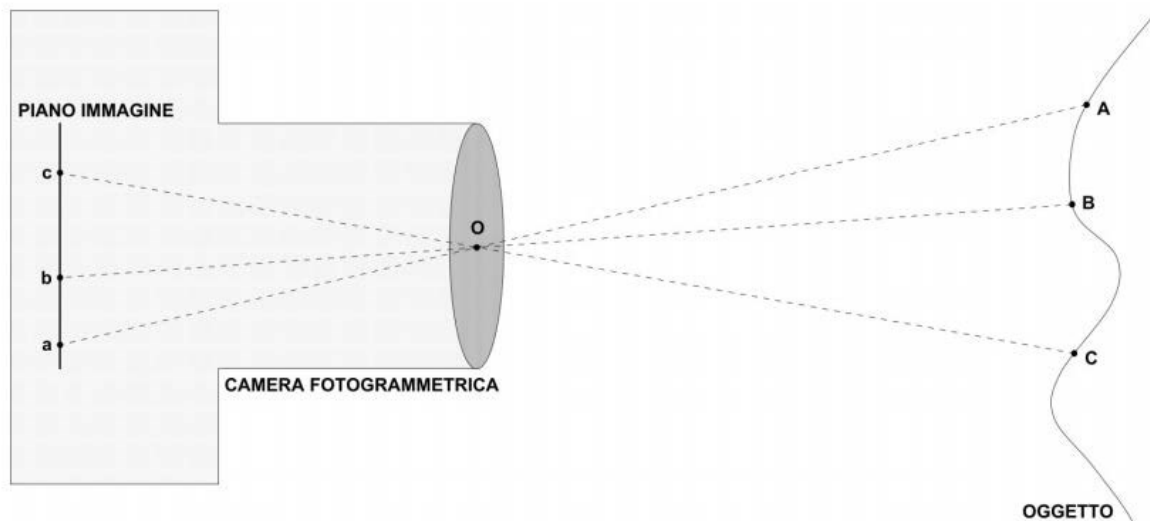


Figura 6: Principio di funzionamento della fotogrammetria;

Lo scopo della fotogrammetria è quindi quello di effettuare il rilievo dell'oggetto direttamente sulle immagini dello stesso, misurando le coordinate dei punti rispetto ad un sistema di riferimento delle immagini e ottenendo le coordinate degli stessi punti in un sistema di riferimento differente, esterno all'immagine e solidale all'oggetto.

In quanto si fa riferimento a due sistemi ben distinti è necessario ricercare delle equazioni matematiche che li mettano in relazione, permettendo il passaggio dall'uno all'altro.

A tal fine viene definito il sistema di riferimento immagine, nello Spazio Immagine (Figura 7), solidale all'immagine stessa: costituito dagli assi  $\xi$  e  $\eta$  che si intersecano nel Centro Fiduciale ( $FC$ ), rappresentante il centro stesso dell'immagine. Generalmente lo Spazio Immagine viene definito con un sistema bidimensionale piano, avente le dimensioni delle immagini fotografiche stesse.

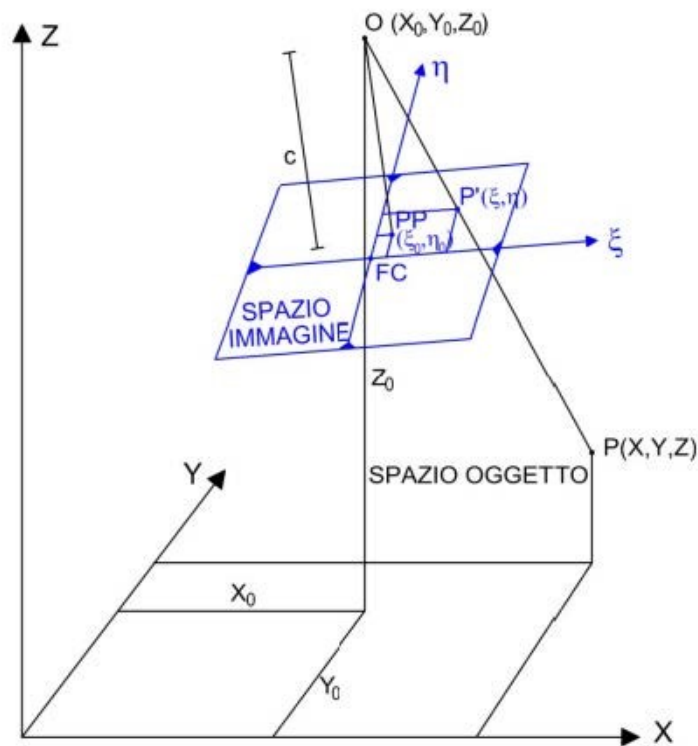


Figura 7: Spazio Immagine e Spazio Oggetto con 1 immagine fotogrammetrica;

Si nota dalla Figura 7 come il Centro Fiduciale ( $FC$ ) non coincida con il Punto Principale ( $PP$ ), il quale viene individuato sullo Spazio Immagine proiettando il Centro di Presa ( $O$ ). Questi due punti differiscono per distanze dell'ordine di qualche decina di micron [ $\mu m$ ], valori che non possono essere trascurati quando si eseguono misure di precisione. Questo rende necessario definire delle coordinate anche per il Punto Principale ( $PP$ ), quale sarà definito, nel sistema di riferimento immagine, dalle coordinate  $\xi_0$  e  $\eta_0$ .

Il sistema di riferimento oggetto, nello Spazio Oggetto, è invece un sistema solidale all'oggetto stesso e può essere individuato dalle coordinate ( $X, Y, Z$ ) in un sistema locale generico o in un sistema cartografico quando l'oggetto di rilievo è il territorio.

Il Centro di Presa dell'immagine ( $O$ ), localizzato nel centro dell'obbiettivo della camera fotogrammetrica, avrà coordinate ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) rispetto al sistema dell'oggetto.

Un punto generico  $P$  dell'oggetto, avente coordinate ( $X, Y, Z$ ) nel sistema di riferimento oggetto, corrisponderà al punto  $P'$  sullo Spazio Immagine, avente

coordinate  $(\xi, \eta)$ , il quale verrà dunque identificato dalla congiunzione tra il punto  $P(X, Y, Z)$  e il Centro di Presa  $O(X_0, Y_0, Z_0)$ .

La distanza tra il Centro di Presa  $O$  e lo Spazio Immagine, misurata lungo la perpendicolare allo spazio stesso, è nota come Distanza Focale ( $c$ ) della camera.

Appare evidente come l'utilizzo di una sola immagine non sia sufficiente per risolvere il problema del rilievo tridimensionale. Infatti, se le coordinate del punto  $P$  sono note nel sistema di riferimento dell'oggetto sarà semplice determinare la sua posizione  $P'$  sullo Spazio Immagine, basterà intersecare la semiretta che collega i punti  $P(X, Y, Z)$  e il centro di Presa  $O(X_0, Y_0, Z_0)$  con il piano dello Spazio Immagine. In questo caso l'immagine è una prospettiva centrale che trasforma uno spazio 3D in uno spazio 2D, nel quale possono essere proiettati i punti. Viceversa, se sono note le coordinate  $(\xi, \eta)$  del punto  $P'$  e si deve determinare la posizione del punto  $P$  sul piano dell'oggetto, con una sola immagine non siamo in grado di fornire informazioni adeguate, in quanto risulterà noto solo che il punto dovrà appartenere alla semiretta di collegamento.

Avendo a disposizione una seconda immagine nella quale è visibile lo stesso punto dell'oggetto di interesse ma acquisita da un punto di vista differente rispetto alla prima, sarà possibile estendere le stesse considerazioni. Come riportato in Figura 8, il punto  $P$  dovrà necessariamente appartenere sia alla semiretta di collegamento tra i punti  $P'(\xi_1, \eta_1)$  e  $O_1(X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$  sia a quella di collegamento tra i punti  $P''(\xi_2, \eta_2)$  e  $O_2(X_{02}, Y_{02}, Z_{02})$ . Il segmento che collega i punti  $O_1$  e  $O_2$  viene definito Base di Presa.

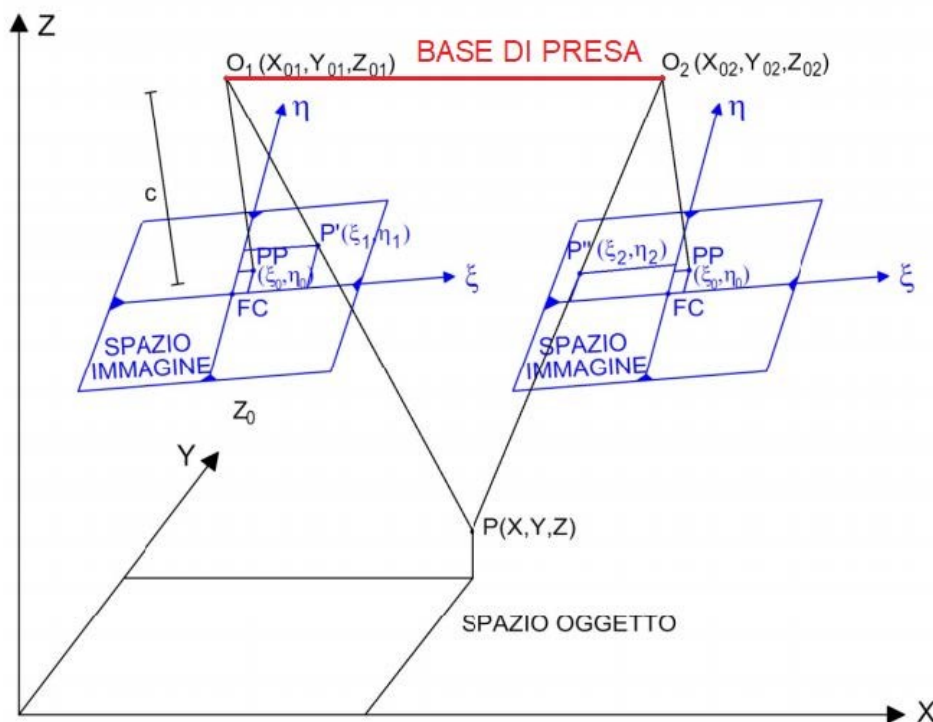


Figura 8: Spazio Immagine e Spazio Oggetto con 2 immagini fotogrammetriche;

## 2.3 – Le equazioni di collinearità

Le equazioni matematiche che permettono il passaggio dal sistema di riferimento dell'immagine a quello dell'oggetto e viceversa prendono il nome di Equazioni di Collinearità. L'obiettivo è quello di misurare direttamente sulle immagini, nello Spazio Immagine, le coordinate  $(\xi, \eta)$  dei punti di interesse, per poi ottenere le coordinate  $(X, Y, Z)$  degli stessi punti nello Spazio Oggetto. Queste relazioni vengono determinate scrivendo le rototraslazioni tra i due sistemi di coordinate e le equazioni di una retta passante per il Centro di Presa  $O$ , il generico punto  $P$  e il corrispondente punto  $P'$ .

Essendo il problema di carattere tridimensionale è necessario considerare tre rotazioni e tre traslazioni ben specifiche.

La rotazione completa nello spazio è composta da tre rotazioni piane successive, corrispondenti alle tre possibili rotazioni dell'aereo di Figura 9:

- Rotazione Primaria o Rollio ( $\omega$  attorno all'asse  $X$ );
- Rotazione Secondaria o Beccheggio ( $\varphi$  attorno all'asse  $y_\omega$ );
- Rotazione Terziaria o Imbardata/Deriva ( $\kappa$  attorno all'asse  $z_{\omega\varphi}$ );

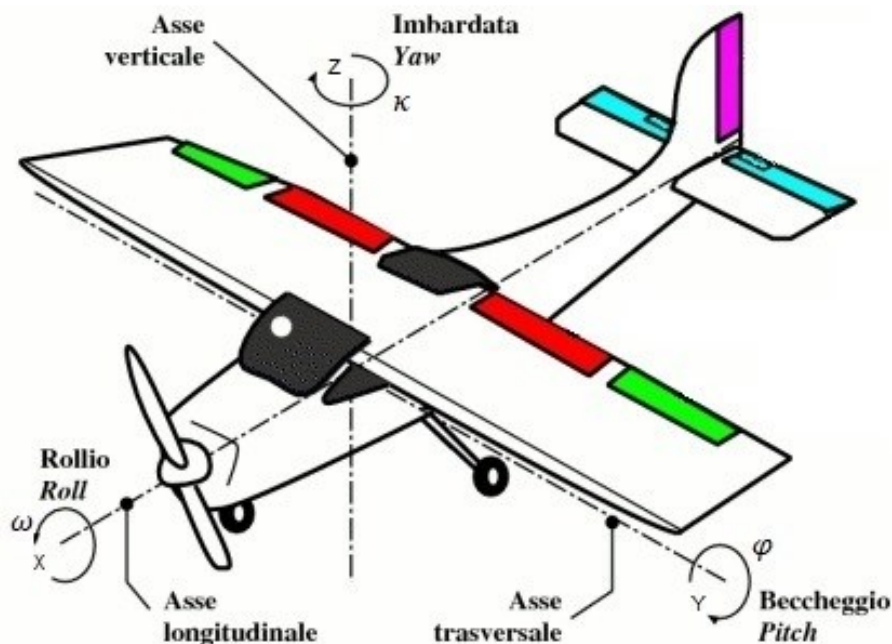


Figura 9: Rotazioni a cui è soggetto il veicolo e la camera al suo interno;

Si nota subito come le rotazioni siano sequenziali, infatti la rotazione secondaria  $\varphi$  non avviene attorno all'asse  $Y$ , ma intorno a  $y_\omega$ , ovvero l'asse che già ha subito la rotazione  $\omega$ ; per lo stesso motivo, la rotazione terziaria  $\kappa$  avviene attorno all'asse  $z_{\omega\varphi}$ , il quale ha precedentemente subito le rotazioni successive  $\omega$  e  $\varphi$  (Figura 10).

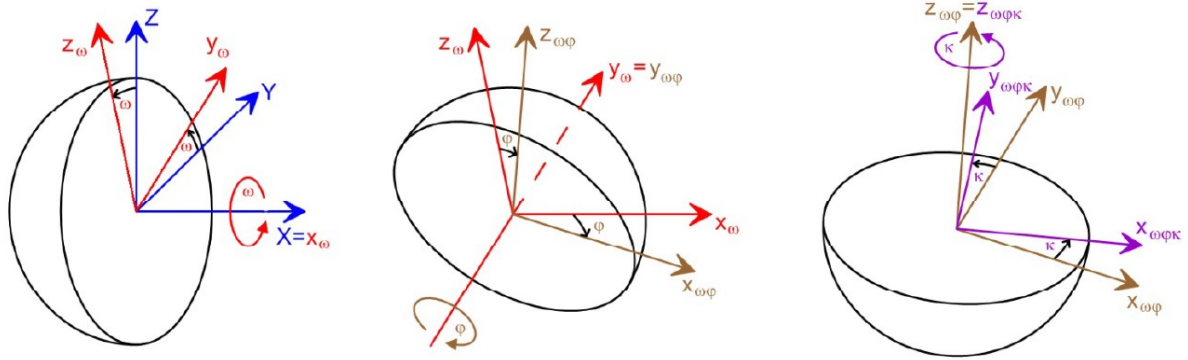


Figura 10: Rotazioni Successive;

Le trasformazioni tra il Sistema Immagine ( $\xi, \eta$ ) e il Sistema Oggetto ( $X, Y, Z$ ) richiedono che venga definita una matrice di rotazione nello spazio tridimensionale. In generale, una trasformazione tra due sistemi di riferimento definiti nello spazio avviene mediante delle rotazioni rispetto a ciascuno degli assi coordinati, dunque, nel nostro caso, per ognuna delle rotazioni sul piano si ottiene una matrice di rotazione  $R$  quadrata ( $3 \times 3$ ).

Per semplicità, è possibile definire un sistema di riferimento ( $X', Y', Z'$ ) parallelo al Sistema Immagine ma traslato nell'origine del Sistema Oggetto, con il quale si è in grado di descrivere la trasformazione come sequenza delle tre rotazioni piane successive ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) utilizzando la matrice inversa  $R^{-1}$  (Figura 11).

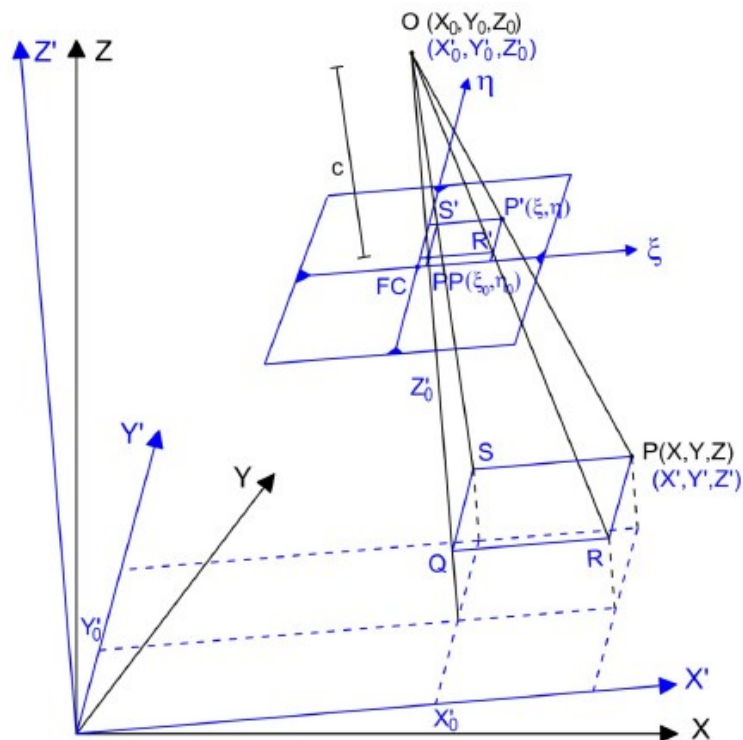


Figura 11: Definizione del sistema di riferimento ( $X', Y', Z'$ );

Applicando la rotazione primaria  $\omega$  è possibile definire il passaggio dal sistema  $(X, Y, Z)$  al sistema  $(x_\omega, y_\omega, z_\omega)$ :

$$\begin{pmatrix} x_\omega \\ y_\omega \\ z_\omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \text{sen}(\omega) \\ 0 & -\text{sen}(\omega) & \cos(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (X = x_\omega)$$

Applicando la rotazione secondaria  $\varphi$  è possibile definire il passaggio dal sistema  $(x_\omega, y_\omega, z_\omega)$  al sistema  $(x_{\omega\varphi}, y_{\omega\varphi}, z_{\omega\varphi})$ :

$$\begin{pmatrix} x_{\omega\varphi} \\ y_{\omega\varphi} \\ z_{\omega\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & 0 & -\text{sen}(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_\omega \\ y_\omega \\ z_\omega \end{pmatrix} \quad (y_\omega = y_{\omega\varphi})$$

Applicando la rotazione terziaria  $\kappa$  è possibile definire il passaggio dal sistema  $(x_{\omega\varphi}, y_{\omega\varphi}, z_{\omega\varphi})$  al sistema  $(x_{\omega\varphi\kappa}, y_{\omega\varphi\kappa}, z_{\omega\varphi\kappa})$ , ovvero il sistema  $(X', Y', Z')$ :

$$\begin{pmatrix} x_{\omega\varphi\kappa} \\ y_{\omega\varphi\kappa} \\ z_{\omega\varphi\kappa} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\kappa) & \text{sen}(\kappa) & 0 \\ -\text{sen}(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{\omega\varphi} \\ y_{\omega\varphi} \\ z_{\omega\varphi} \end{pmatrix} \quad (z_{\omega\varphi} = z_{\omega\varphi\kappa})$$

La rotazione complessiva sarà data da:

$$(x, y, z) = (X', Y', Z') = R^{-1} (X, Y, Z) = R_\omega R_\varphi R_\kappa (X, Y, Z)$$

Dove  $R_\omega, R_\varphi, R_\kappa$  rappresentano le matrici che definiscono le tre rotazioni piane nello spazio. Essendo per definizione la matrice  $R$  ortonormale, la sua inversa coinciderà con la sua trasposta ( $R^{-1} = R^T$ ), di conseguenza dalla matrice inversa  $R^{-1}$  sarà possibile risalire alla matrice di rotazione completa  $R$ :

$$R = \begin{pmatrix} \cos(\kappa) \cos(\varphi) & -\text{sen}(\kappa) \cos(\varphi) & \text{sen}(\varphi) \\ \cos(\kappa) \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\omega) + \cos(\omega) \text{sen}(\kappa) & \cos(\kappa) \cos(\omega) - \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\omega) \text{sen}(\kappa) & -\text{sen}(\omega) \cos(\varphi) \\ \text{sen}(\omega) \text{sen}(\kappa) - \cos(\kappa) \text{sen}(\varphi) \cos(\omega) & \cos(\omega) \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\kappa) + \cos(\kappa) \text{sen}(\omega) & \cos(\varphi) \cos(\omega) \end{pmatrix}$$

Utilizzando le relazioni di similitudine tra triangoli e la relazione che il sistema di riferimento  $(X', Y', Z')$  ha rispetto il Sistema Oggetto  $(X, Y, Z)$ , è possibile definire le equazioni che permettono la definizione delle coordinate  $\xi$  e  $\eta$ :

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11} (X - X_0) + r_{21} (Y - Y_0) + r_{31} (Z - Z_0)}{r_{13} (X - X_0) + r_{23} (Y - Y_0) + r_{33} (Z - Z_0)}$$

$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12} (X - X_0) + r_{22} (Y - Y_0) + r_{32} (Z - Z_0)}{r_{13} (X - X_0) + r_{23} (Y - Y_0) + r_{33} (Z - Z_0)}$$

Queste equazioni sono definite “Equazioni di Collinearità”, e permettono il passaggio dal sistema di riferimento dell’immagine fotogrammetrica a quello dell’oggetto di interesse. note le coordinate di quest’ultimo e i parametri di trasformazione:

- Parametri di orientamento interno (caratteristiche geometriche interne alla camera):

$c$                       distanza principale o distanza focale;

$\xi_0, \eta_0$               coordinate del Punto Principale (*PP*);

- Parametri di orientamento esterno (caratteristiche geometriche della camera rispetto il sistema di riferimento dell’oggetto considerato):

$X_0, Y_0, Z_0$       coordinate del Centro di Presa (*O*) nel sistema di riferimento dell’oggetto;

$\omega, \varphi, \kappa$             rotazioni della camera nello spazio (contenuti nei parametri  $r_{ij}$ );

Le equazioni inverse, con cui esprimere le coordinate del Sistema Oggetto a partire da quelle del Sistema Immagine, sono:

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11} (\xi - \xi_0) + r_{12} (\eta - \eta_0) + r_{13} c}{r_{31} (\xi - \xi_0) + r_{32} (\eta - \eta_0) + r_{33} c}$$

$$Y = \eta_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21} (\xi - \xi_0) + r_{22} (\eta - \eta_0) + r_{23} c}{r_{31} (\xi - \xi_0) + r_{32} (\eta - \eta_0) + r_{33} c}$$

In questo caso  $X, Y$  dipendono entrambe da  $Z$ , che non è nota. Dunque, sarà necessario disporre di almeno altre due equazioni in modo da formare un sistema a 4

equazioni e 3 incognite, facilmente risolvibile. Questo si traduce nella necessità di possedere almeno due immagini fotogrammetriche in cui sia visibile lo stesso punto di interesse, ma prese con due punti di vista differenti.

## **2.4 – I parametri di orientamento**

La risoluzione del problema fotogrammetrico richiede la conoscenza dei parametri di orientamento, definibili come le variabili del problema. Generalmente i parametri di orientamento interno sono noti se si utilizza una camera metrica, dato che vengono forniti dal costruttore della camera stessa attraverso opportuni documenti chiamati “certificati di calibrazione”. Se la camera non è metrica, i valori dei parametri devono essere calcolati. Invece, i parametri di orientamento esterno, non essendo noi, devono essere sempre determinati. Per fare ciò, si utilizzano dei punti aventi coordinate note nel Sistema Oggetto e presi nella zona di sovrapposizione delle immagini fotogrammetriche, in quello che viene definito Modello Fotogrammetrico. Questi punti prendono il nome di “Punti Fotografici d’Appoggio” (PFA).

Nel caso generale in cui si dispone di due immagini prese con la stessa camera metrica, i parametri di orientamento interno sono 3 e sono noti. Differentemente i parametri di orientamento esterno sono 12, in quanto vengono considerate due immagini prese da due punti di vista differenti, e dovranno essere definiti attraverso i PFA.

Nel caso specifico, utilizzando 1 PFA, sarà possibile definire un sistema di 4 equazioni a 12 incognite, ovvero i parametri di orientamento interno delle due immagini. Utilizzando 2 PFA non sarà ancora possibile risolvere il problema, poiché si definirebbero 8 equazioni a 12 incognite, note le coordinate stesse dei PFA. Risulta ovvio che il numero minimo di punti fotografici d’appoggio per poter risolvere le equazioni di collinearità è 3, in quanto si definisce un sistema di 12 equazioni a 12 incognite, dunque risolvibile.

Una volta che sono stati determinati tutti i parametri di orientamento esterno, sarà possibile effettuare il rilievo sulle immagini attraverso le equazioni di collinearità. Se la camera non fosse metrica, quindi con i parametri di orientamento interni non noti, il numero minimo di PFA da considerare è 4, in quanto alle 16 equazioni di collinearità disponibili corrispondono 15 parametri incogniti. Nel caso particolare in cui si

utilizzano camere non metriche e tra loro differenti, il numero minimo di PFA da considerare è 5, dato che si deve risolvere un sistema di 20 equazioni a 18 incognite.

## 2.5 – **Modalità di orientamento esterno**

L'orientamento può avvenire utilizzando diversi metodi:

- Orientamento indipendente e separato delle due immagini;
- Orientamento simultaneo e congiunto delle due immagini in una fase;
- Orientamento simultaneo e congiunto delle due immagini in due fasi;

La tipologia di orientamento scelta è l'Orientamento simultaneo e congiunto delle due immagini in due fasi. Questo perché si ha la necessità di vincolare le due immagini fotogrammetriche tra loro, in modo da poter confrontare le differenze tra le due. Inoltre, l'utilizzo di questo tipo di orientamento consente di ottenere una soluzione più precisa e affidabile rispetto agli altri due.

Il processo di orientamento avviene attraverso due fasi successive: durante la prima fase del processo viene generato un modello fotogrammetrico utilizzando un sistema di riferimento generico, chiamato Sistema Modello. Le due immagini vengono orientate utilizzando solamente i punti legame e le equazioni di collinearità. In questo modo, si passa dal sistema di riferimento delle immagini ( $\xi, \eta$ ) ad un sistema di riferimento modello non determinato ( $x, y, z$ ), in quanto le coordinate dei punti legame sono incognite. Una volta che il modello è stato definito, deve essere trasformato nel Sistema Oggetto, scalando e traslando il Sistema Modello stesso. Per fare ciò, viene utilizzata la relazione:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{pmatrix} + m R_{\Omega\phi K} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Dove:

- $(X, Y, Z)$ : Coordinate del punto generico nel Sistema Oggetto;
- $(X_M, Y_M, Z_M)$ : Coordinate dell'origine del Sistema Modello nel Sistema Oggetto;
- $m$ : Fattore di scala della trasformazione;
- $R_{\Omega\phi K}$ : Matrice di rotazione tra il Sistema Modello e il Sistema Oggetto;
- $(x, y, z)$ : Coordinate del punto generico nel Sistema Modello;

I 7 parametri  $\Omega, \phi, K, m, X_M, Y_M, Z_M$  prendono il nome di Parametri di orientamento assoluto (Figura 12).

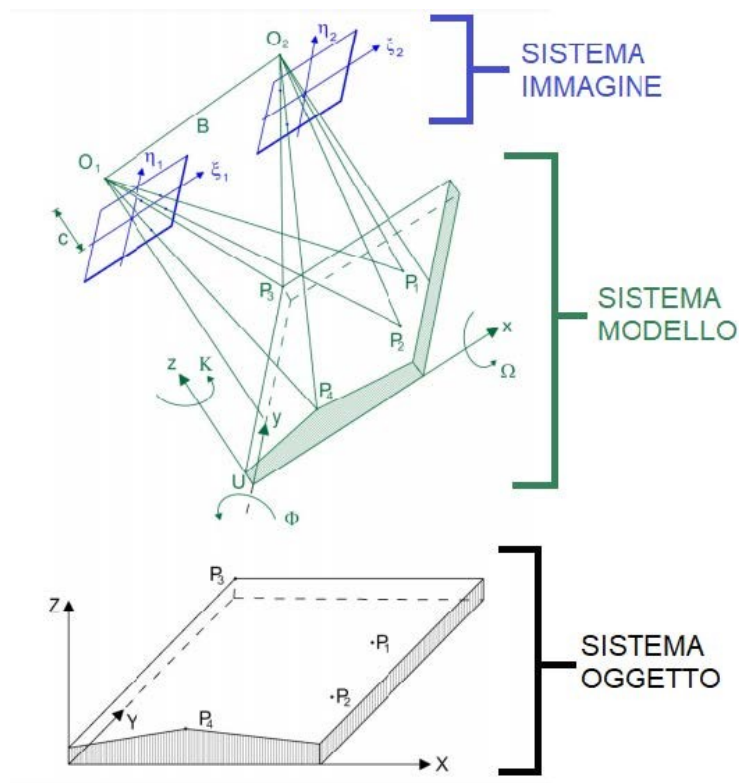


Figura 12: Orientamento simultaneo e congiunto di due immagini in due fasi;

Occorre determinare un totale di 12 parametri, di cui 7 vengono risolti nella seconda fase e gli altri 5 nella prima, ovvero nella generazione del modello fotogrammetrico. Di conseguenza, per trovare i 5 parametri mancanti è necessario utilizzare almeno 5 punti di legame per risolvere un sistema di 20 equazioni, che coinvolgono i 5 parametri e le 15 coordinate. La trasformazione dal modello fotogrammetrico al sistema oggetto richiede l'utilizzo dei soli PFA. Per risolvere i 7 parametri di orientamento assoluto si utilizzano le equazioni di roto-traslazione nello spazio con il fattore di scala. È importante notare che la matrice di rotazione nello spazio per le rotazioni  $(\Omega, \phi, K)$  è diversa da quella per le rotazioni  $(\omega, \varphi, \kappa)$ , le quali descrivono di passaggio diretto da Sistema Immagine e Sistema Oggetto. Per risolvere il sistema di 7 equazioni nelle 7 incognite, si utilizzano almeno 7 punti noti. In particolare, 3 equazioni per ogni punto plano-altimetrico noto, 2 equazioni per ogni punto planimetrico noto e 1 equazione per ogni punto altimetrico noto. Per risolvere algebricamente il sistema, sono necessari almeno 2 punti planimetrici e 3 punti altimetrici, oppure 2 punti plano-altimetrici e 1 punto altimetrico.

Il vantaggio di questo metodo è che richiede un numero minimo di PFA, che sono costosi da rilevare in campo. Inoltre, può utilizzare punti noti solo in planimetria o solo in altimetria. Lo svantaggio è che aumenta il numero di passaggi per la trasformazione dal Sistema Immagine al Sistema Oggetto, il che può aumentare gli errori e la loro propagazione.

# ELABORAZIONE DEI DATI FOTOGRAMMETRICI

In questo elaborato si esamina l'andamento nel tempo del quadro fessurativo in due edifici di Rovegliana, frazione di Recoaro Terme (VI), al fine di analizzare l'impatto dei fenomeni franosi che hanno interessato la zona negli ultimi decenni.

### 3.1 – *Dati*

I due casi considerati sono una parete della chiesa di Rovegliana, e una parete di un edificio di una sua frazione, Cappellazzi. Per ogni edificio si dispone di due ortofoto, scattate a due anni di distanza l'una dall'altra, una nel 2019 e una nel 2021. Entrambe raffigurano la parete dal medesimo punto di vista, al fine di poter identificare la variazione della fessurazione nel tempo.

La metodologia utilizzata per ricavare le ortofoto è la fotogrammetria terrestre (Capitolo 2), che consiste nel posizionare una camera fotogrammetrica su un treppiede con l'obiettivo rivolto verso l'oggetto d'interesse, nel nostro caso le pareti dei due edifici in esame.

Nelle Figure da 13 a 16 vengono riportate le due ortofoto relative rispettivamente alla chiesa, e all'edificio a Cappellazzi. In ciascuna coppia, l'ortofoto del 2021 presenta già una metrica definita, ovvero la relazione tra le dimensioni effettive degli oggetti nella realtà e le dimensioni rappresentate nell'ortofoto.



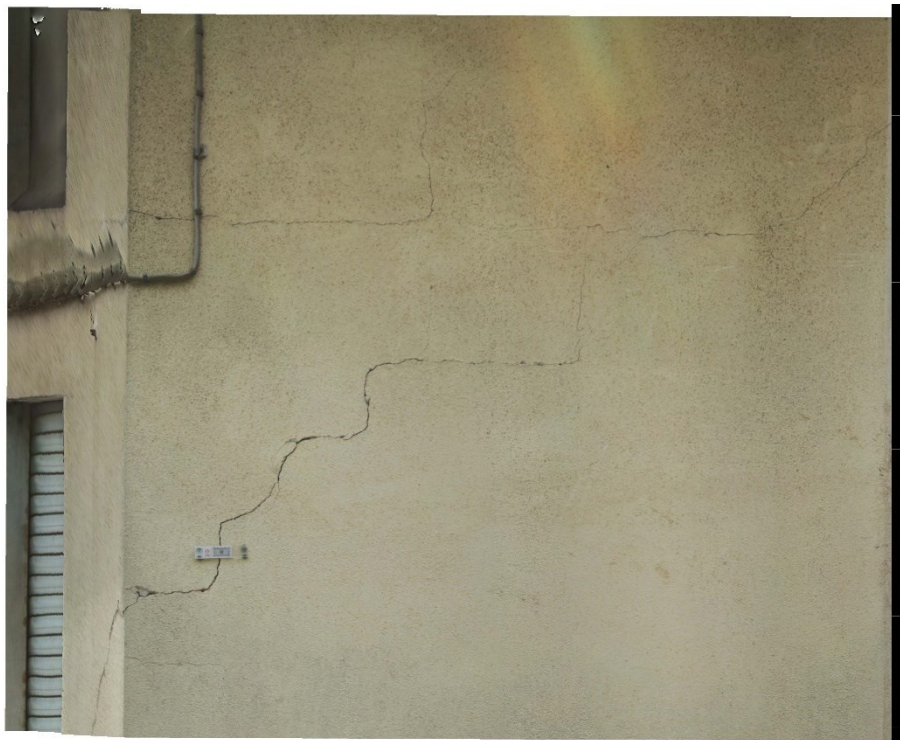
*Figura 13: Ortofoto della chiesa a Rovigliana, anno 2019;*



*Figura 14: Ortofoto della chiesa a Rovigliana, anno 2021;*



*Figura 15: Ortofoto dell'edificio a Cappellazzi, anno 2019;*



*Figura 16: Ortofoto dell'edificio a Cappellazzi, anno 2021;*

### **3.2 – Elaborazione delle ortofoto**

Questa sezione descrive la metodologia utilizzata per l'analisi di ciascuna coppia di ortofoto, con l'obiettivo di valutare l'andamento del quadro fessurativo delle pareti in oggetto. Il software utilizzato è AutoCAD 2022 e il procedimento seguito, per ogni coppia di ortofoto è quello descritto in seguito.

Inizialmente, le due ortofoto in formato *.tif* sono state importate in due layer separati. È stato necessario referenziare l'ortofoto del 2019 rispetto a quella del 2021 al fine di allinearle per avere gli stessi punti di riferimento spaziale e poterle confrontare o sovrapporre con il minimo margine d'errore. Nota la metrica dell'ortofoto del 2021, si è potuta calcolare la superficie totale della parete.

Successivamente, una griglia verticale con rette equidistanti tra loro di 15cm è stata costruita ed estesa per tutta la superficie dell'ortofoto. L'incrocio di una retta con la fessurazione definisce un punto, dal quale si è tracciato un segmento ortogonale alla polilinea. La lunghezza di questo segmento indica lo spessore della fessura in quel punto. A causa l'andamento irregolare della fessurazione, non sono stati ricavati valori utili allo studio del quadro fessurativo (Figure 17 e 18).

Dunque, è risultato necessario cambiare approccio, studiando l'andamento del quadro fessurativo considerando il rapporto tra le aree fessurate e la lunghezza della fessurazione.

In ciascuna delle due ortofoto, l'andamento della fessurazione è stato delineato utilizzando una polilinea. Le polilinee della chiesa a Rovegliana e dell'edificio a Cappellazzi sono state rappresentate in dettaglio nelle Figure da 19 a 26. In ogni figura, le parti numerate corrispondono a zone in cui la fessurazione risultava più marcata, e l'area di queste zone è stata calcolata. La lunghezza totale di ciascuna polilinea è stata calcolata sommando la lunghezza di ogni segmento di cui era composta. Nelle aree in cui la fessurazione risultava più marcata, la lunghezza del segmento sommato equivaleva a quello congiungente i segmenti rispettivamente precedente e successivo, e in grado di dividere in due parti circa uguali la superficie considerata.

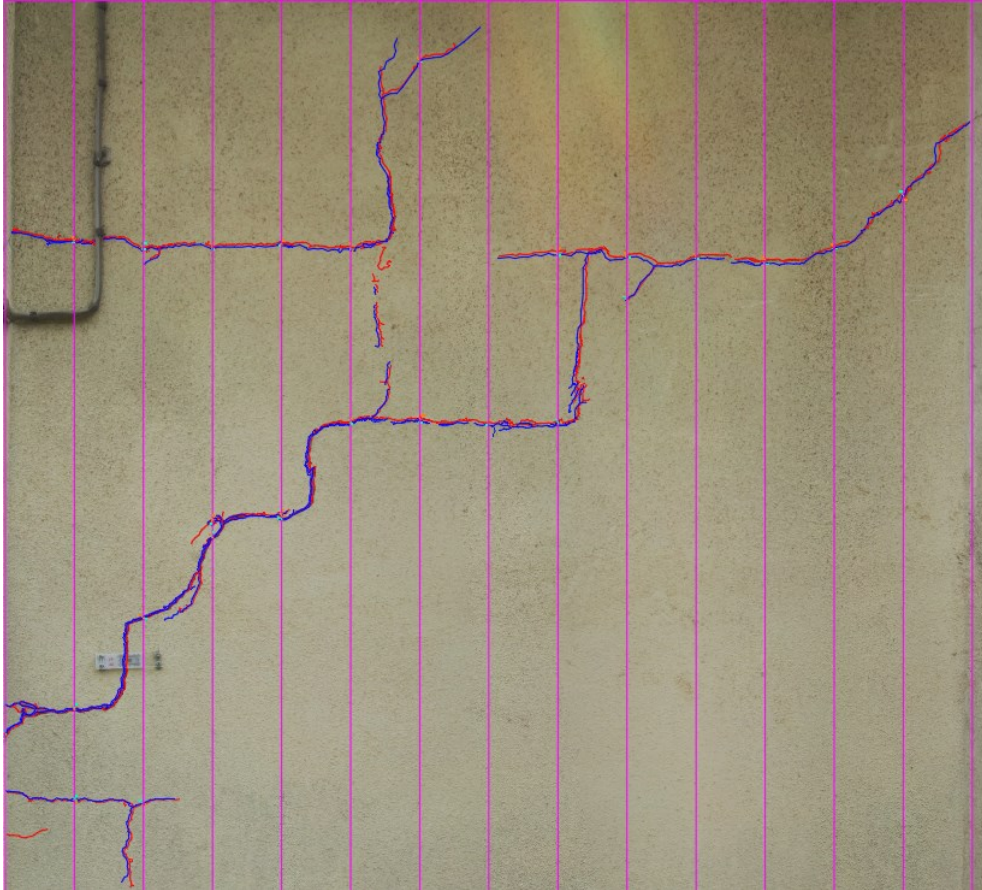


Figura 17: Rappresentazione della griglia verticale (rosa) sull'ortofoto a Cappellazzi, anno 2021;

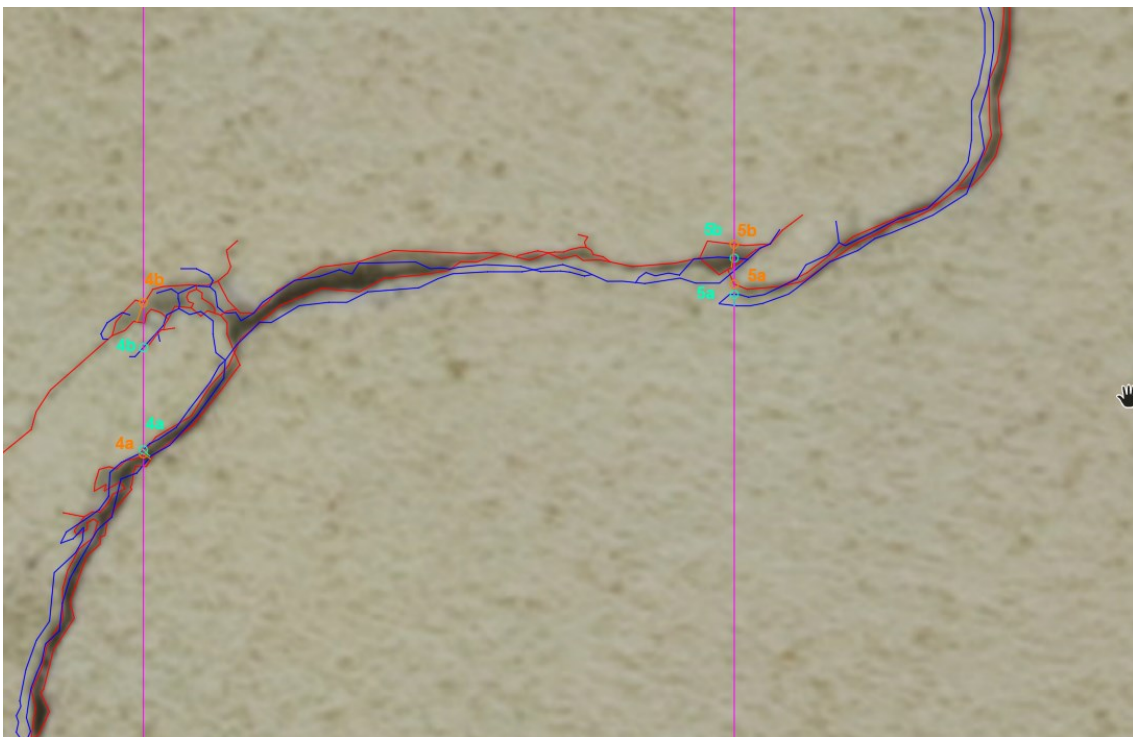
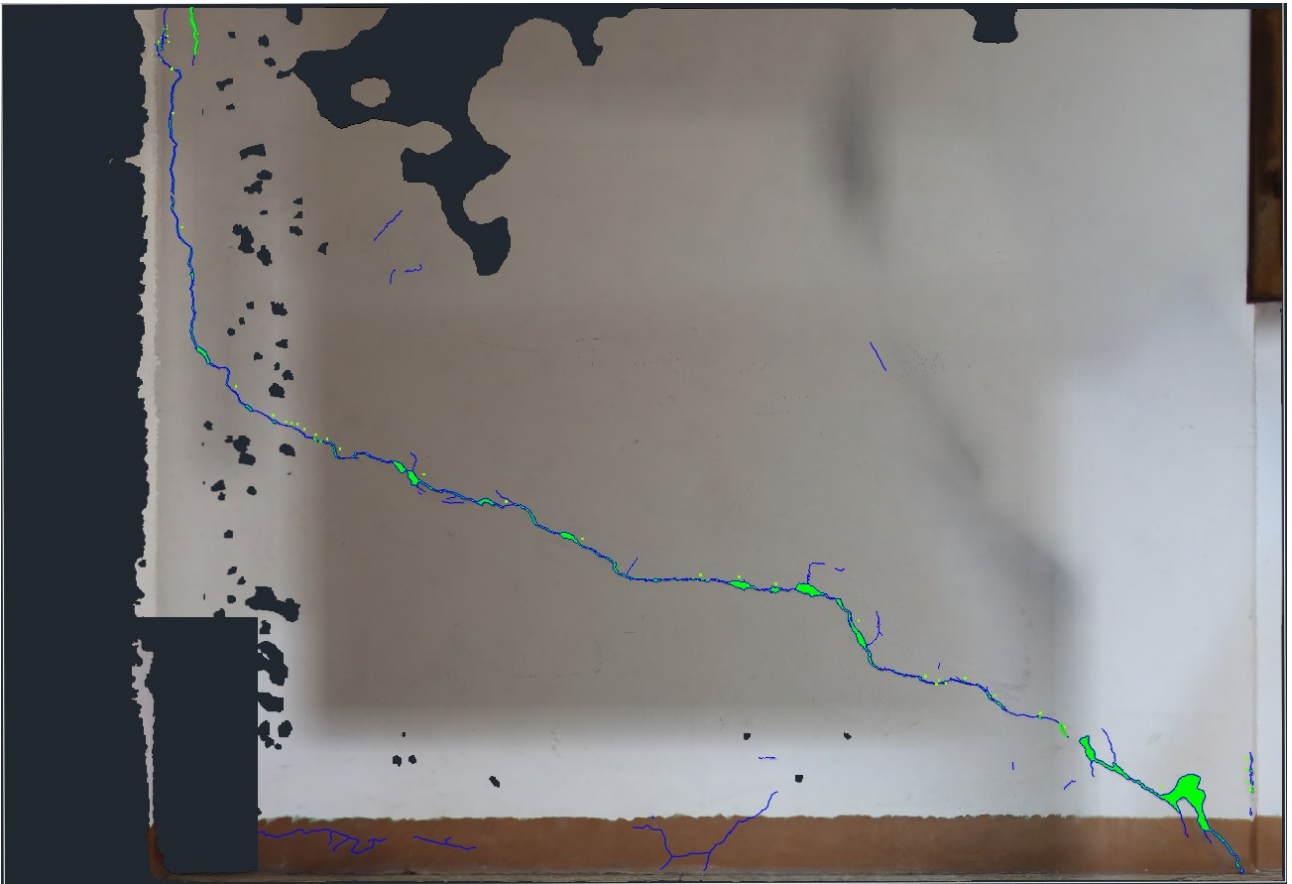


Figura 18: Dettaglio della griglia verticale (rosa) sull'ortofoto e dei punti di intersezione tra la griglia, la polilinea che descrive l'andamento della fessurazione nell'anno 2019 (blu) e la polilinea del 2021 (rossa) a Cappellazzi; i punti di intersezione sono rappresentati in verde per il 2019 e in arancione per il 2021;



*Figura 19: Restituzione della fessurazione nella chiesa a Rovegliana; in blu è rappresentata la polilinea che descrive l'andamento della fessurazione e in verde le zone in cui è stata calcolata l'area; anno 2019;*



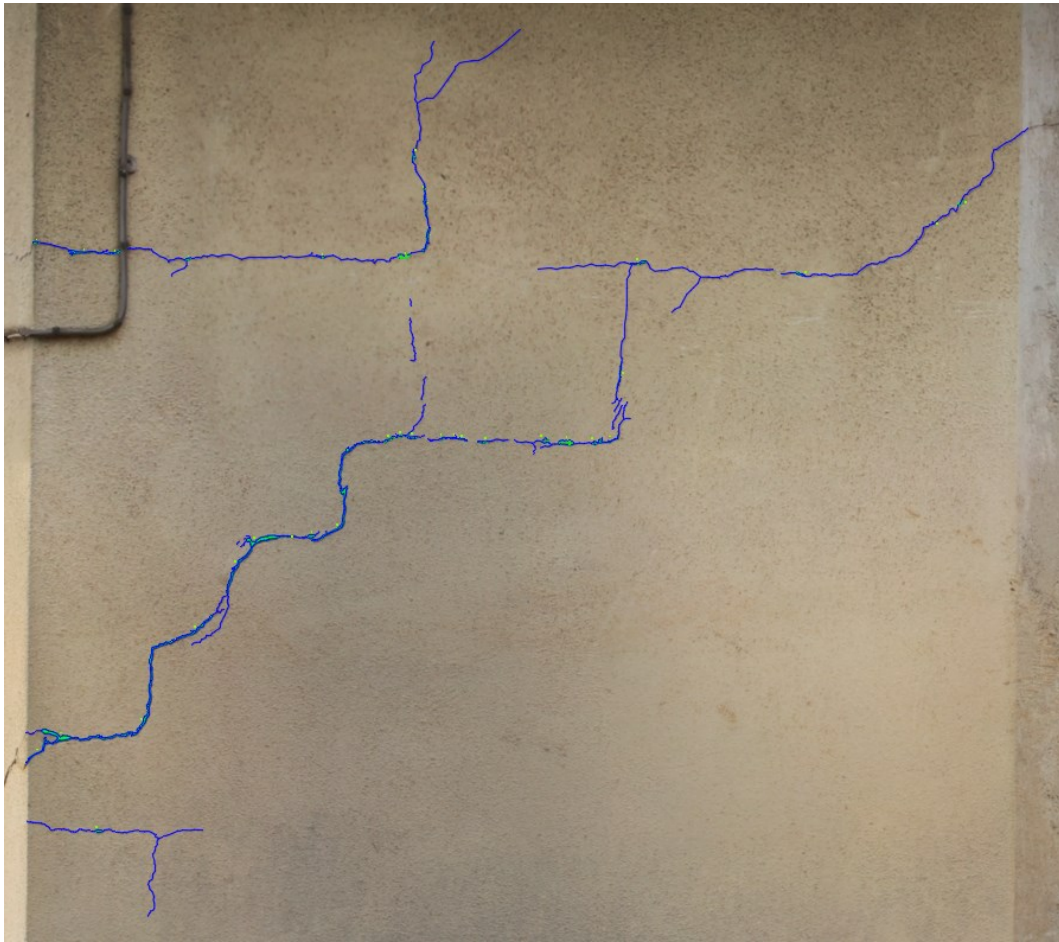
*Figura 20: Dettaglio della restituzione della fessurazione nella chiesa a Rovegliana; anno 2019;*



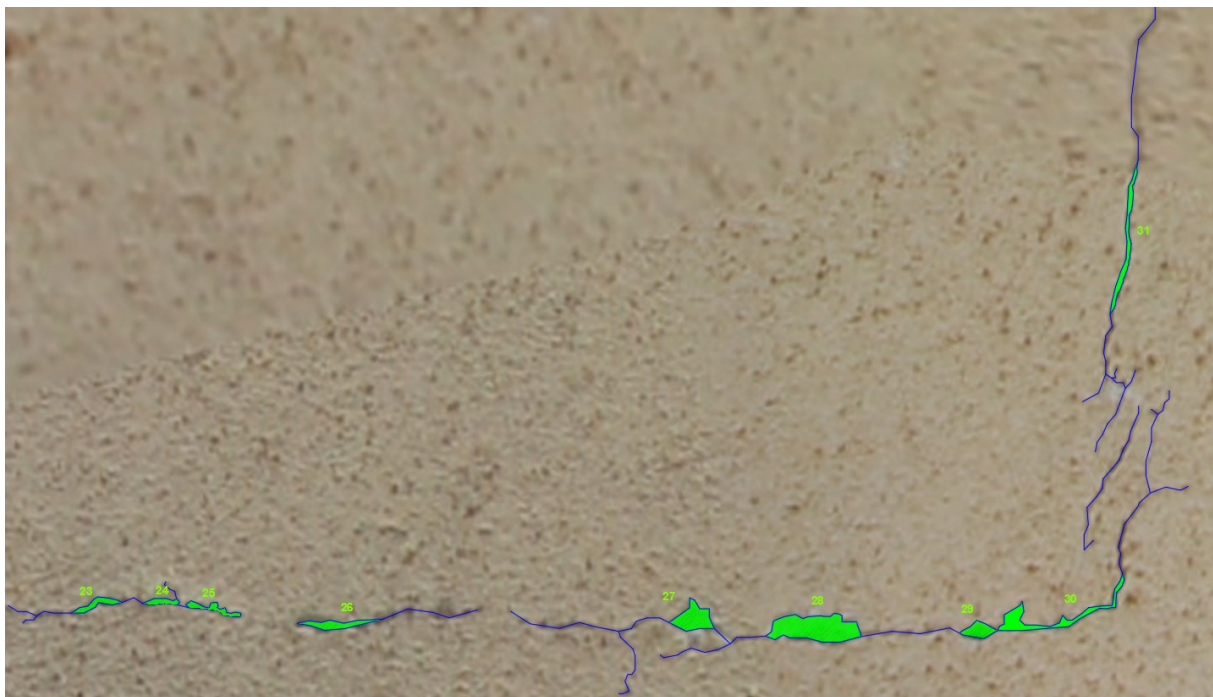
*Figura 21: Restituzione della fessurazione nella chiesa a Rovigliana; in rosso è rappresentata la polilinea che descrive l'andamento della fessurazione e in giallo le zone in cui è stata calcolata l'area; anno 2021;*



*Figura 22: Dettaglio della restituzione della fessurazione nella chiesa a Rovigliana; anno 2021;*



*Figura 23: Restituzione della fessurazione nell'edificio a Cappellazzi; in blu è rappresentata la polilinea e in verde le zone in cui è stata calcolata l'area; anno 2019;*



*Figura 24: Dettaglio della restituzione della fessurazione nell'edificio a Cappellazzi; anno 2019;*



*Figura 25: Restituzione della fessurazione nell'edificio a Cappellazzi; in rosso è rappresentata la polilinea e in giallo le zone in cui è stata calcolata l'area; anno 2021;*



*Figura 26: Dettaglio della restituzione della fessurazione nell'edificio a Cappellazzi, anno 2021;*

### **3.3 – ANALISI DEI RISULTATI**

Nel presente lavoro di tesi, al fine di valutare la variazione del quadro fessurativo dei due edifici in questione nel corso dei due anni, sono state costruite diverse tabelle che consentono il confronto dei dati raccolti.

Inizialmente, per poter definire gli spessori della fessurazione, è stata costruita una tabella contenente i punti, le lunghezze dei segmenti che definiscono lo spessore e le differenze di questi segmenti nei due anni.

Data la scarsa accuratezza del metodo applicato al nostro caso, è stato cambiato approccio:

Sono state considerate le aree delle fessurazioni più significative, al fine di stimare la differenza di superficie fessurata di ogni zona e l'area totale fessurata.

Successivamente, è stata calcolata la lunghezza totale della fessurazione, sommando ogni segmento componente la polilinea e i segmenti che definiscono l'asse di simmetria, nella direzione della fessurazione, di ogni zona più evidente.

Infine, utilizzando i valori raccolti, è stato possibile stimare un rapporto tra l'area totale fessurata e la lunghezza totale della fessurazione.

La procedura descritta è stata ripetuta sia per la chiesa a Roveglia che per l'edificio a Cappellazzi, e le considerazioni riportate per la prima hanno valenza anche per la seconda, le cui tabelle sono riportate nell'Appendice A.

### 3.3.1 – CHIESA A ROVEGLIANA

2019		2021		
Punti	Spessore [cm]	Punti	Spessore [cm]	Differenza [cm]
1a	-	1a	0	-
1b	-	1b	0	-
1c	-	2a	0	-
1d	-	2b	0	-
1e	0,15807	1e	0,3595	0,201433
1f	-	1f	0,31695	-
1g	-	1g	0,18634	-
1h	-	1h	1,3546	-
1i	0,15976	1i	0,13676	-0,023
1l	0	1l	0,35605	0,356052
2a	0	2a	0	0
2b	-	2b	0	-
2c	0	2c	0,30085	0,300845
3a	0	3a	-	-
3b	0,08247	3b	0	-0,08247
4a	0	4a	-	-
4b	-	4b	0	-
4c	-	4c	0	-
4d	-	4d	0	-
4e	0,19931	4e	0,22749	0,028179
5a	0,27138	5a	1,1046	0,833221
6a	0,26853	6a	0,27341	0,004875
7a	0	7a	-	-
7b	0,22581	7b	0,16893	-0,05689
8a	0,21715	8a	0,48576	0,268603
9a	0,50348	9a	0,48765	-0,01583
9b	2,04872	9b	-	-
9c	-	9c	0	-
10a	0,13705	10a	0,11953	-0,01752
11a	0,19387	11a	0,20698	0,013117
12a	-	12a	0	-
12b	0,62236	12b	0,82211	0,199754
13a	0	13a	0	0
13b	1,43684	13b	0,26596	-1,17088

Tabella 1: Spessori delle fessure nella chiesa a Rovigliana;

Nella Tabella 1 i numeri indicano il numero della colonna, mentre le lettere rappresentano le fessure considerate. Nel caso in cui non ci sia alcun numero presente, significa che non vi è alcuna fessura intercettata. Invece, i valori nulli indicano la mancanza di area associata alla fessura lungo la retta numerata.

Nella Tabella 2 vengono riportate tutte le aree, ricavate in mm<sup>2</sup>, relative alle fessurazioni evidenziate dalla polilinea e numerate come nelle Figure 19 e 21.

2019		2021					
Zona	Area [mm <sup>2</sup> ]	Zona	Area [mm <sup>2</sup> ]				
1	244,46	1	71,19	21	111,97	21	5,11
2	3,66	2	64,36	22	1148,93	22	17,88
3	4,00	3	96,64	23	6,22	23	11,57
4	46,51	4	2078,84	24	961,52	24	51,14
5	0,76	5	26,97	25	55,04	25	480,85
6	0,87	6	3,97	26	458,34	26	175,02
7	11,65	7	1,52	27	176,04	27	1611,09
8	9,71	8	645,13	28	1554,76	28	71,75
9	31,04	9	4,90	29	62,65	29	5,01
10	7,81	10	39,90	30	0,89	30	19,10
11	418,80	11	18,88	31	1,89	31	74,10
12	879,23	12	138,29	32	17,10	32	285,89
13	208,14	13	2,32	33	66,51	33	16,38
14	53,64	14	977,69	34	214,03	34	4979,01
15	3,93	15	255,83	35	15,69	35	4,37
16	4,20	16	914,63	36	88,39	36	65,29
17	12,78	17	11,23	37	4628,52	37	12,89
18	18,30	18	10,18	38	15,11	38	45,22
19	40,08	19	63,46	39	23,79	39	22,18
20	16,43	20	12,24	40	18,77	40	15,08
				41	10,81	41	19,75
				<b>TOTALE</b>	<b>11652,97</b>	<b>TOTALE</b>	<b>13426,85</b>

*Tabella 2: Aree delle zone con la fessurazione più marcata nella chiesa a Rovigliana;*

Dalla Tabella 2 emerge che l'area totale fessurata dell'anno 2019 risulta inferiore a quella del 2021, indicando un incremento del quadro fessurativo nei due anni.

Non essendoci una diretta corrispondenza tra le zone individuate nel 2019 e nel 2021, in Tabella 3 si riportano le corrispondenze e se ne calcola la differenza tra le superfici.

2019	2021				
Zone	Zone	Differenza sulla fessurazione [cm <sup>2</sup> ]			
1	1	-1,7327			
4	2	0,1785			
7,8,9,10	3	0,3643			
11,12	4	7,8081			
13,14,15, 16,17,18	8	3,4414			
19	9,10	0,0472			
20	11	0,0245			
21	12	0,2632			
22	13,14,15	0,8691			
24	16,17,18, 19,20,21,	0,8478			
				22,23	
			25	24	-0,039
			26	25	0,2251
			27	26	-0,0102
			28	27	0,5633
			29	28	0,091
			30,31	29	0,0223
			32	30	0,02
			33	31	0,0759
			34	32	0,7186
			35,36,37	34	2,4641
			38	37	-0,0222
			39	38	0,2143
			40	39	0,0341
			41	40	0,0427

Tabella 3: Corrispondenza delle zone per la chiesa a Rovegliana;

La presenza di zone composte dalla somma di più zone definite in anni diversi può essere dovuta alla risoluzione delle ortofoto utilizzate per l'analisi, che potrebbero essere state acquisite con una risoluzione differente. La presenza di valori negativi nella Tabella 3 potrebbe essere dovuta alla qualità dell'ortofoto utilizzata, oppure a possibili imprecisioni durante il tracciamento della polilinea. È importante sottolineare che l'analisi di ortofoto è soggetta a diverse fonti di incertezza, e che i risultati ottenuti devono essere interpretati tenendo conto delle possibili fonti di errore e delle limitazioni del metodo utilizzato.

	2019	2021
Area totale della parete [cm <sup>2</sup> ]	28886	
Area totale della fessurazione [cm <sup>2</sup> ]	116,5297	134,2685
Differenza sulle aree fessurate [cm <sup>2</sup> ]	17,7388	
% di area fessurata rispetto la parete	0,4034%	0,4648%
Differenza sulle % delle aree fessurate	0,0614%	
Lunghezza totale della fessurazione [m]	5,183	6,150
Differenza sulle lunghezze delle fessurazioni [m]	0,967	
Rapporto tra area e lunghezza [cm <sup>2</sup> /m]	3,423	2,885
Differenza sui rapporti [cm <sup>2</sup> /m]	0,538	

Tabella 4: Differenze di aree e lunghezze nella chiesa a Rovegliana;

### **3.4 – CONCLUSIONI**

Durante la valutazione dello spessore della fessurazione, non sono state osservate progressioni significative a causa della limitata precisione del metodo utilizzato. I risultati ottenuti dal calcolo dello spessore non sono stati significativi per descrivere le differenze nella fessurazione, suggerendo che il metodo utilizzato non è efficace nel calcolo di piccolissime variazioni, ma funziona per variazioni più rilevanti.

Tuttavia, lo studio delle differenze di area ha permesso di ottenere una visione complessiva dell'andamento delle fessurazioni nel tempo.

I risultati ottenuti, con una differenza tra i rapporti area/lunghezza di 0,538 cm<sup>2</sup>/m per la chiesa a Rovegliana e 0,136 cm<sup>2</sup>/m per l'edificio a Cappellazzi, suggeriscono che il quadro fessurativo di entrambe le strutture non sia variato significativamente nell'arco dei due anni di monitoraggio. In altre parole, le strutture hanno subito una variazione sulle fessurazioni minore di un centimetro quadrato per metro, dunque non rilevante.

Questo può essere un'indicazione positiva per la stabilità degli edifici, ma non esclude necessariamente la necessità di monitorare costantemente la situazione. Infatti, anche una minuscola variazione, può essere il segnale di un possibile problema che potrebbe peggiorare nel tempo se non viene monitorato.

## **BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA**

- “Principi di Fotogrammetria” – Massimo Fabris;
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), via Vitaliano Brancati, 48 - Roma

<https://www.isprambiente.gov.it/it>

<https://annuario.isprambiente.it/>

# APPENDICE A

2019		2021		Differenza [cm]
Punti	Spessore [cm]	Punti	Spessore [cm]	
1a	0,19476	1a	0,28238	0,087627
1b	0	1b	-	-
2a	0,77506	2a	0	-0,77506
2b	0,50151	2b	0,3444	-0,15711
2c	0,13014	2c	0,20748	0,07734
3a	0	3a	0	0
3b	0,29919	3b	0,22835	-0,07084
3c	0	3c	0	0
3d	-	3d	0	-
3e	-	3e	0	-
3f	-	3f	0	-
3g	-	3g	0	-
4a	0,24693	4a	0,23191	-0,01501
4b	0	4b	0,51329	0,513291
4c	0	4c	0	0
5a	0,28144	5a	0	-0,28144
5b	0,34031	5b	0,5908	0,250494
5c	0	5c	0,01405	0,014048
6a	0,2773	6a	0,18219	-0,09511
6b	0	6b	0	0
7a	0	7a	0,1756	0,175595
7b	-	7b	0	-
7c	0	7c	0	0
8a	0	8a	0	0
9a	0,37715	9a	0,18366	-0,19349
9b	0	9b	0	0
10a	0	10a	-	-
10b	0	10b	0	0
11a	0	11a	0	0
12a	0	12a	0,19432	0,194323
13a	0	13a	0	0
14a	0,20561	14a	0	-0,20561

Tabella A1: Spessori delle fessure nell'edificio a Cappellazzi;

2019		2021	
Zona	Area [mm <sup>2</sup> ]	Zona	Area [mm <sup>2</sup> ]
1	26,91	1	40,41
2	162,99	2	124,73
3	51,17	3	62,38
4	38,06	4	498,60
5	35,83	5	9,17
6	127,94	6	12,07
7	136,38	7	19,91
8	121,30	8	32,23
9	22,52	9	12,41
10	62,77	10	73,18
11	152,56	11	10,91
12	487,93	12	188,85
13	1078,51	13	121,25
14	273,73	14	184,33
15	325,42	15	37,21
16	492,51	16	10,31
17	16,14	17	201,08
18	96,35	18	539,03
19	852,11	19	1708,75
20	59,37	20	331,66
21	32,38	21	105,23
22	83,28	22	356,20
23	33,40	23	9,38
24	20,37	24	25,07
25	31,33	25	73,65
26	53,82	26	59,01
27	97,07	27	875,79
28	247,78	28	84,14

29	47,54	29	30,23
30	116,88	30	25,32
31	74,24	31	31,38
32	88,39	32	5,56
33	64,54	33	67,73
34	5,82	34	7,75
35	32,34	35	47,04
36	71,59	36	103,57
		37	273,65
		38	94,99
		39	99,67
		40	11,39
		41	8,98
		42	58,80
		43	76,87
		44	32,38
		45	109,27
		46	13,10
		47	7,51
		48	4,67
		49	17,98
		50	70,70
		51	18,04
		52	23,77
		53	22,46
		54	7,43
		55	30,62
		56	10,40
		57	8,14
<b>TOTALE</b>	5721,27	<b>TOTALE</b>	7126,34

Tabella A2: Aree delle zone con la fessurazione più marcata nell'edificio a Cappellazzi;

2019	2021	
Zone	Zone	Differenza sulla fessurazione [cm <sup>2</sup> ]
1	1	0,135
2	2,3	0,2412
3	4	4,4743
4	8	-0,0583
5	10	0,3735
6	12	0,6091
7	13	-0,1513
8,9	14	0,4051
10	15	-0,2556
11	17	0,4852
12	18	0,511
13,14	19	3,5651
15	20	0,0624
16	21,22	-0,3108

17	23,24	0,1831
18	25	-0,227
19,20,21	26,27	-0,0906
22	28	0,0086
23	29	-0,0317
24	30	0,0495
25	31	0,0005
26	33,34	0,2166
27	36	0,065
29	38	0,4745
30	39	-0,1721
31	42,43	0,6143
32	45	0,2088
33	50	0,0616
34	54	0,0161
35	55	-0,0172

Tabella A3: Corrispondenza delle zone per l'edificio a Cappellazzi;

	2019	2021
Area totale della parete [cm <sup>2</sup> ]	74240	
Area totale della fessurazione [cm <sup>2</sup> ]	57,2127	71,2634
Differenza sulle aree fessurate [cm <sup>2</sup> ]	14,0507	
% di area fessurata rispetto la parete	0,0771%	0,0960%
Differenza sulle % delle aree fessurate	0,0189%	
Lunghezza totale della fessurazione [m]	6,362	6,779
Differenza sulle lunghezze delle fessurazioni [m]	0,418	
Rapporto tra area e lunghezza [cm <sup>2</sup> /m]	2,209	2,073
Differenza sui rapporti [cm <sup>2</sup> /m]	0,136	

Tabella A4: Differenze di aree e lunghezze nell'edificio a Cappellazzi;