

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO DICAM

*CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA CIVILE*

TESI DI LAUREA

in

FOTOGRAMMETRIA

**Dalla generazione di modelli 3D densi mediante TLS e fotogrammetria alla
modellazione BIM**

CANDIDATO
Rosario Alessandro Longo

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Antonio Zanutta

CORRELATORI:
Chiar.mo Prof. Stefano de Miranda
Dott. Ing. Valentina Alena Girelli
Ing. Maurizio Serpieri
Ing. Mirko Dellapasqua
Ing. Ilenia Selvaggi

Anno Accademico 2015/16

Sessione III

A tutti voi,
che non avete mai perso la fiducia in me,
grazie.

Sommario

INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1	4
Inquadramento storico	4
1.1 Il palazzo imperiale	4
1.2 Storia della Basilica di Sant’Apollinare Nuovo	5
1.3 Ristrutturazioni recenti.....	8
1.4 Il campanile di Sant’Apollinare Nuovo	9
1.5 Risultati dell’analisi dei materiali	11
1.6 Arco di Augusto di Rimini.....	12
1.7 Breve storia dei restauri	15
1.8 Fontanella nel giardino “Villa Cassarini”	16
CAPITOLO 2.....	18
La progettazione integrata, BIM.....	18
2.1 Introduzione	18
2.2 Operatività.....	21
2.2.1 Il BIM Manager	21
2.2.2 Il livello di sviluppo LOD.....	21
2.2.3 Le dimensioni del BIM.....	23
2.2.4 La gestione temporale delle attività e dei costi	24
2.2.5 La gestione del patrimonio costruito, il BIM 6D	25
2.3 Modellazione.....	26
2.3.1 BIM Authoring	26
2.3.2 Model Checking.....	27
2.3.3 Code Checking.....	27

2.4 Il BIM Strutturale integrato con il calcolo FEM.....	28
CAPITOLO 3	31
Geomatica	31
3.1 Fotogrammetria	31
3.1.1 Orientamento interno di una camera metrica	32
3.1.2 La fotogrammetria digitale	36
3.1.3 Trattamento delle immagini digitali	39
3.1.4 Acquisizione analogica e digitale	44
3.1.5 Image Matching.....	50
3.1.6 I detectors per rilevare i punti di interesse.....	65
3.1.7 Structure From Motion: Bundler	68
3.2 Laser Scanner	70
3.2.1 Sensori a triangolazione.....	70
3.2.2 Sensori a tempo di volo	73
CAPITOLO 4.....	75
Breve descrizione dei software utilizzati.....	75
4.1 Autodesk ReMake	75
4.2 Rapidform XOR3	76
4.3 Rhinoceros5.....	76
4.4 Midas NFX e GEN.....	77
4.5 Autodesk Revit.....	78
CAPITOLO 5.....	80
Sperimentazione di procedure di modellazione a partire da nuvole dense di punti	80
5.1. Fase 1: Determinazione della procedura CSF su una struttura di piccole dimensioni, la fontanella del giardino “Villa Cassarini”	81
5.2.1. Metodo 1: Creazione del modello dalla nuvola di punti	83
5.2.2. Metodo 2: creazione del modello unico con un software BIM	99
5.2.3. Metodo 3: creazione del modello ad elementi separati con un software BIM	110
5.2. Fase 2: studio dell’Arco d’Augusto di Rimini.....	112

5.2.1.	Creazione del modello dalla nuvola di punti (Metodo 1).....	115
5.2.2.	Creazione del modello ad elementi distinti con un software BIM	126
5.3.	Il caso del campanile di Sant' Apollinare Nuovo in Ravenna.....	141
CAPITOLO 6	.....	143
Conclusioni e sviluppi futuri	.....	143
6.1	Conclusioni.....	143
6.2	Sviluppi futuri	145
Indice Analitico	.....	147
Bibliografia	.....	150
Sitografia	.....	153
Allegati	.....	155
Immagini Fontanella	.....	155
Immagini Arco di Augusto	.....	163
Immagini Campanile di Sant' Apollinare Nuovo	.....	167
Ringraziamenti	.....	169

INTRODUZIONE

Lo scopo di questa tesi di laurea è quello di trovare una procedura applicativa in grado di riportare il rilievo di una struttura, effettuato mediante fotogrammetria o laser scanner, in un software agli elementi finiti FEM attraverso l'uso di software CAD e di software BIM. Con il termine BIM, acronimo di *Building Information Modeling*, si intende una **metodologia** di lavoro resa possibile dalle nuove tecnologie che permette di passare dalla classica progettazione sequenziale con diverso grado di dettaglio (progetto preliminare, definitivo ed esecutivo) che causa una continua perdita di informazioni ad ogni passaggio di documentazione tra le parti coinvolte, ad una progettazione integrata rendendo più efficiente l'accumulo e la gestione delle informazioni.

L'argomento risulta essere di molta attualità data la notevole difficoltà che esiste nel passaggio da una metodologia all'altra; i software FEM sono ormai di larghissimo utilizzo per la loro capacità di suddividere la struttura in elementi di piccole dimensioni, gli elementi finiti appunto, in modo da ottenere un'analisi praticamente puntuale lungo tutta la struttura e non solo in alcuni punti caratteristici, come ad esempio i nodi o la mezzeria di una trave. Riuscire a realizzare un modello fedele di un edificio storico consentirebbe quindi di analizzare nel dettaglio le eventuali criticità permettendo di salvaguardare al meglio il patrimonio di cui l'Italia è ricca. Tuttavia durante l'importazione del modello CAD o BIM in un software FEM si incontrano dei problemi di compatibilità; oltre a dover trovare un modo per distinguere gli elementi portanti, atti a rispondere alle sollecitazioni, dagli altri si ha il problema di far coincidere il modello architettonico con quello analitico: ad esempio le variazioni di sezioni degli elementi possono portare ad un disassamento dei nodi di calcolo o ancora la parametrizzazione utilizzata da un software BIM per descrivere un elemento a curvatura semplice o doppia non è utilizzabile nella sintassi di un software FEM.

Si può inoltre osservare che la realizzazione convenzionale di un modello in un software FEM prevede l'utilizzo di poche misure puntuali degli elementi caratteristici; tale metodo è sicuramente accettabile nel caso del progetto di un nuovo edificio particolarmente regolare ma determina notevoli semplificazioni

nel caso di studio di strutture storiche che presentano una forma molto irregolare a causa di deformazioni non elastiche e di interventi di manutenzione avvenute nel corso degli anni. In questi casi la possibilità di importare un modello tridimensionale realizzato da una nuvola di punti ricavata con metodi fotogrammetrici o con scansione laser può permettere di ottenere risultati più precisi in un tempo di esecuzione minore.

La fotogrammetria è una delle discipline afferenti alla geomatica, materia che si occupa della gestione automatizzata dell'informazione relativa al territorio, e permette di ottenere informazioni metriche tridimensionali di un oggetto, quindi la sua forma e la sua posizione, mediante l'acquisizione, la misura e l'elaborazione di immagini fotografiche. Il risultato è una nuvola di punti dalla quale è possibile ricostruire la superficie studiata. Lo stesso risultato si può ottenere attraverso una scansione laser con i procedimenti che verranno richiamati nel capitolo 3.2.

L'utilizzo della nuvola di punti non è tuttavia immediato, si è passati infatti da un metodo che utilizza poche misure puntuali ad uno che prevede diverse misure su ogni cm² di superficie, ottenendo quindi una mole di dati attualmente non gestibile da un software FEM. È quindi necessario trovare il punto di incontro tra queste discipline. I risultati sono stati confrontati con altri metodi, tradizionali e non, studiati in altri lavori di laurea.

Sono state prese in esame tre strutture: l'Arco di Augusto a Rimini, una fontanella del giardino pubblico "Villa Cassarini" di Bologna e il campanile della basilica di Sant'Apollinare Nuovo a Ravenna.

L'Arco di Augusto è una struttura chiusa che quindi non presenta vuoti al suo interno, per la quale si dispone di un completo rilievo fotografico ad accezione della sommità, mentre la fontanella è stata scelta in quanto le sue dimensioni ridotte hanno consentito un agevole rilievo fotografico anche della parte superiore senza dover ricorrere all'utilizzo di droni.

Per quanto riguarda il campanile di Sant'Apollinare Nuovo si dispone sia di un rilievo con laser scanner terrestre che di un rilievo fotografico ma entrambe non consentono una copertura completa della struttura, manca infatti il rilievo della parte posteriore e della sommità.

Questo elaborato può essere suddiviso in tre blocchi: al primo blocco appartiene il primo capitolo dove viene fatto un inquadramento storico dei monumenti studiati sia dal punto di vista del loro significato sia dei lavori di ristrutturazione che nel tempo sono stati effettuati. Il secondo blocco è

prettamente teorico e comprende il capitolo secondo e terzo. In particolare nel secondo capitolo vengono riportati i concetti chiave della moderna metodologia BIM mettendo in risalto le potenzialità, gli strumenti e le nuove figure tecniche, come il *BIM Manager*, necessarie per coordinare il lavoro, mentre nel terzo viene riportata una sintesi degli argomenti principali della fotogrammetria con particolare interesse per le procedure automatiche che stanno alla base dei software utilizzati nella parte sperimentale. L'ultimo blocco è quello sperimentale che inizia al quarto capitolo con una breve introduzione dei software che sono stati utilizzati, continua con il quinto dove nei primi paragrafi vengono illustrati nel dettaglio i comandi necessari per eseguire la procedura Cloud-Solid-Fem (CSF) mentre nei restanti vengono riportate le analisi e i confronti dei risultati con gli altri metodi usati in passato per lo studio dell'Arco di Augusto. Infine nel sesto capitolo vengono discusse le conclusioni con particolare attenzione agli sviluppi futuri.

CAPITOLO 1

Inquadramento storico

1.1 Il palazzo imperiale [1]

Non è facile determinare una sicura data di fondazione della Basilica di Sant'Apollinare Nuovo.

Lo storico Andrea Agnello ci ha rimandato l'iscrizione "*THEODERICVS REX HANC ECCLESIAM A FVNDAMENTIS IN NOMINE DOMINI NOSTRI IESV CHRISTI FECIT*" che consente di attribuire la costruzione dell'edificio di culto al sovrano goto Teodorico che regnò a Ravenna fra il 493 e il 526 e inoltre che nelle vicinanze vi fosse l'omonimo palazzo. I sostenitori di questa teoria individuano in Sant'Apollinare Nuovo la cappella palatina.

Tuttavia alcuni storici ritengono che tale iscrizione sia posteriore alla primitiva fondazione dell'edificio affermando che la corte di Onorio, dopo il trasferimento da Milano a Ravenna nel 402, sia stata fondata su un sito già occupato da un edificio privato che successivamente è stato monumentalizzato.

Attorno alla corte sarebbero sorti altri edifici adibiti sia a funzioni pubbliche che a residenza privata dando un indizio a conferma dell'esistenza di un quartiere adibito ad accogliere la corte imperiale prima e la corte teodoriciano poi sul modello del palazzo imperiale di Costantinopoli, tanto da poter dire che il complesso ravennate ne fosse "una sorta di calco topografico"¹.

Infine si ritiene che la distruzione del complesso situato ad est della basilica di Sant'Apollinare sia stata molto lenta tanto che nel XVI secolo l'area fosse ancora occupata dai ruderi soggetti ad una continua spoliazione avviata da Carlo Magno, grazie all'autorizzazione ottenuta dall'allora papa Adriano I nel 787, per la realizzazione della sua residenza ad Aquisgrana².

¹ Baldini Lippolis 1997, p.2

² Questo evento è riportato dal cronista Eginardo, "Vita Karoli Magni, 26"

Tra il 1908 e il 1914 sono state eseguite diverse campagne di scavo nell'attuale area dei Salesiani che hanno permesso a Liliana Caroli di realizzare una pianta sia delle strutture rinvenute che dei ritrovamenti effettuati.

Questa campagna di scavi ha consentito anche di riportare alla luce numerosi frammenti di pavimentazione in mosaico e *opus sectile*³ [S.1] distribuiti su vari livelli d'uso. Non è stato facile individuare le quote dei diversi piani pavimentali, tuttavia si è stati in grado di stabilire il rapporto tra fra il piano d'uso primitivo della chiesa, 0.65m dallo 0.00 dell'Idrometro della Darsena, e i piani pavimentali delle fasi tardoantiche rinvenute nell'area dei Salesiani oscillanti tra lo 0.00 e -0.45m dallo 0.00 dell'Idrometro.

1.2 Storia della Basilica di Sant'Apollinare Nuovo

Originariamente la chiesa fu intitolata a S. Martino, vescovo di Tours distintosi per la lotta contro gli eretici, ed era nota come “in ciel d'oro” per la magnificenza del soffitto ornato con stucchi d'oro. Successivamente, rispettando la tradizione medievale che voleva vi fossero state trasferite le spoglie del protomartire Apollinare, prevalse l'abitudine di chiamarla come quest'ultimo con l'apposizione di “*in novo*” per distinguerla dalla chiesa di Sant'Apollinare “*in veclo*”, attuale convento delle Cappuccine, in via Pietro Alighieri.

³ L'*Opus sectile* è un'antica tecnica artistica che utilizza marmi (o, in alcuni casi, anche paste vitree) tagliati per realizzare pavimentazioni e decorazioni murarie a intersio. Fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Opus_sectile

La facciata, restaurata in seguito al bombardamento che il 12 febbraio 1916 ha danneggiato la parte superiore, ha subito molte modifiche nei secoli. Sulla facciata originaria si aprivano tre porte d'accesso, rinvenute in seguito a dei sondaggi archeologici, mentre per il tratto superiore possiamo fare riferimento ad un'opera del 1766 di Onofrio Gramignani, Figura 1, incisore palermitano, che riporta una bifora in cui dovevano essere impiegati i due pulvini ritrovati in seguito ai lavori di ripristino al bombardamento. Inoltre davanti alla facciata si univa senza continuità il quadriportico che sorgeva sull'attuale piazzetta.



Figura 1: Facciata della chiesa riprodotta da Onofrio Gramignani, 1766, Biblioteca Casanatense, Roma, 20. B. I. 3/34bis)

Sono giunte a noi anche numerose tavole di Flaminio da Parma del 1760 che riportano la pianta della chiesa, il prospetto del campanile e alcuni particolari degli elementi decorativi.

Tuttavia per conoscere la storia dell'edificio dalla sua fondazione al XV secolo è necessario rifarsi alle indagini archeologiche.

E' già stato accennato che il piano pavimentale in uso non è quello originario ma è quello raggiunto dopo il 1512 quando l'edificio fu concesso ai Frati Minori Osservanti. In quella data l'edificio versava in totale degrado a causa del saccheggio avvenuto dopo la Battaglia di Ravenna (1512), per questo venne istituito un fondo per il restauro quasi interamente speso per la sopraelevazione del pavimento e delle colonne che vennero riutilizzate senza alterarne le dimensioni⁴.

Circa a 95-105 cm al di sotto della pavimentazione del 1513, ripristinata dopo la seconda guerra mondiale, si trova un piano a "quadrelli" laterizi, sotto al quale si trova un piano in fase con l'accesso alla cripta ed infine un livello

⁴ Tale operazione è stata ben documentata da Corrado Ricci ed è contenuta nei volumi di Cancelleria dell'Archivio Storico del Comune di Ravenna. Parti, A, n.28, c. 43v: 28luglio 1513.

primitivo; in totale tra il piano attuale e il primitivo si ha uno scarto che varia tra i 145-150 cm, mentre si ritiene che il piano del quadriportico esterno fosse a circa 210 cm al disotto del piano d'uso attuale.

I disegni dell'Azzaroni rivelano nell'area del quadriportico la presenza di un piano pavimentale intermedio in sassi di fiume probabilmente in relazione col pavimento in quadrelli di cotto dell'edificio. Tale piano pare tagliare in alcuni punti strutture primitive del quadriportico.

Sondaggi realizzati nel 1950 hanno mostrato che l'abside originale fosse a pianta circolare all'interno e poligonale all'esterno secondo la consuetudine ravennate per gli edifici di culto dal V secolo.

La chiesa risulta suddivisa in tre navate separate da due filari di dodici colonne i cui fusti, le basi e i capitelli sono pezzi prefabbricati importati da Costantinopoli dove, nei secoli V e VI, gli arredi architettonici e di culto venivano realizzati in serie utilizzando un marmo bianco con venature grigiastre che aveva la particolarità di essere molto tenero.

Si ipotizza che nell'VIII secolo la chiesa abbia subito delle modifiche strutturali in seguito ad alcune scosse di terremoto che colpirono la zona; non è nota l'entità dei danni ma si ritiene che sia avvenuto un crollo dell'abside, successivamente ricostruita, e che anche la calotta e il tratto superiore della facciata necessitassero di interventi di ristrutturazione.

Gli scavi di Giuseppe Gerola (1914-1919) hanno riportato alla luce la cripta; si tratta di un vano seminterrato inserito nell'abside datata, anche grazie alle analisi condotte attorno agli anni '50 da Mario Mazzotti, attorno alla fine del IX secolo.

Il Mazzotti ritenne che la cripta, del tipo ad "ambulacro anulare" fosse legata alla tradizione secondo la quale le spoglie di Apollinare, primo vescovo di Ravenna, fossero state trasferite in città dalla basilica di Sant'Apollinare in Classe in quanto minacciate dalle incursioni di pirati saraceni.

Egli riteneva infine che con l'introduzione della cripta si ebbe anche il rialzo del piano del pavimento con aggiunta di terreno di riporto e che fosse altresì molto probabile che nella stessa fase di ristrutturazione fosse stato costruito il primo tratto del campanile a pianta cilindrica. Per questa realizzazione si eseguirono alcune modifiche come la parziale ricostruzione del quadriportico e del tratto di facciata a cui il campanile si appoggia, ma anche in questo caso si ha un disaccordo tra gli storici, il Gerola ritiene infatti che la realizzazione

del campanile sia posteriore a quella della cripta e che risalga al XI secolo⁵, periodo nel quale anche la facciata subì modifiche diventando un corpo unico a doppio spiovente con una sola parete centrale adattandosi così ai “gusti” medioevali.

Il campanile viene citato per la prima volta nel 1270 e venne ampliato in pieno medioevo con l’aggiunta di un tratto murario in cui vennero collocati alcuni bacini di ceramica e, visto che in genere la collocazione dei bacini nella murature degli edifici è contemporanea alla loro produzione, possiamo affermare che la seconda fase costruttiva del campanile sia da contenersi entro il XII secolo.

Infine si riporta che, sempre secondo le ricerche condotte dal Gerola, nel XIII secolo la facciata della chiesa subì un rinnovamento, all’altezza della porta d’ingresso centrale, sfruttando materiali di riutilizzo della parte superiore giunta fino a noi con poche modifiche.

1.3 Ristrutturazioni recenti

I lavori di ristrutturazione ad opera dei Minori Osservanti (1512) hanno riguardato, oltre ai già citati, l’apertura lungo il fianco nord dell’edificio per realizzare, in tempi diversi, delle cappelle e anche la nuova abside demolendo la precedente.

Si giunge quindi al 16 luglio 1830 anno in cui viene redatta una relazione sullo stato di forte degrado della copertura della chiesa dove si hanno ingenti infiltrazioni d’acqua tanto da spezzare una catena e danneggiare pesantemente altre zone dell’edificio come la biblioteca e una soffitta.

I lavori presero il via nella seconda metà del XIX secolo e riguardarono, oltre alla copertura e la riapertura di alcune finestre murate (1897), anche le pareti, il portichetto e la pavimentazione nella navata centrale proveniente dalla soppressa chiesa ravennate di S. Nicolò con conseguente adattamento della pavimentazione delle navate laterali a quella centrale. Successivamente venne ripristinato il chiostro (1888).

⁵ Gerola 1916, pp.18-23

Un'altra importante campagna di ristrutturazione avvenne nel 1916 in seguito all'esplosione di un ordigno della prima guerra mondiale che interessò l'angolo nord della facciata.

1.4 Il campanile di Sant'Apollinare Nuovo [2]

Il campanile sorge alla destra della basilica è alto poco più di 38 metri ed è suddiviso in tre grandi fasce, la prima dal basso costituita da tre ordini di monofore, la seconda da tre ordini di bifore e la terza da due ordini di trifore.

In sommità sono inseriti nelle murature dei bacini ceramici del XII secolo che hanno portato alcuni storici ad ritenere che gli ultimi due ordini possano essere più recenti degli altri.

Infine la copertura è sorretta da un cornicione in cotto con una doppia ghiera a dente di sega.

Gli storici non sono tutti d'accordo riguardo alle fasi e sul periodo di realizzazione della torre, tra questi si citano:

Savini che data la torre di poco posteriore al VI secolo ritenendo sia stata realizzata in occasione "*reconciliatio*" al culto cattolico del 561.

Galassi basandosi sulla quota della pavimentazione originaria e sulle analisi stilistiche degli elementi scultorei la datò tra la fine del XIII e l'inizio del IX secolo individuando in essa il prototipo delle torri cilindriche ravennati.

Mazzotti, al contrario dei primi due che ritengono che il campanile sia stato eretto in una sola fase adducendo all'uniformità della tessitura muraria, ritenne che la torre sia stata costruita in due fasi, la prima attorno al IX secolo e la seconda, dove vennero realizzati i due ordini di trifore, visto il doppio profilo delle aperture dette sopraccigliature, attorno all'anno 1000.

Nella Tabella 1 vengono riportate le datazioni del campanile secondo alcuni storici:

Studioso	Datazione	Annotazioni
Bovini	X-XI	Conferma la datazione proposta da Mazzotti
Galassi	VIII-IX	Per confronto con le quote del Palazzo di Teodorico
Gardella	X	
Gerola	VIII-IX	Ritiene posteriore l'ultimo piano per presenza dei bacini
Mazzotti	X	Porzione superiore del sec. XI per la <i>sopraccigliatura</i>
Ricci	fine X	Costruito dai Benedettini dopo il 973
Romanelli	XI	Costruzione in un'unica fase. Rimaneggiato nel XII sec.
Rusconi	VII	
Savini	posteriore VI	
Serafini	VIII-IX	Trifore databili alla fine X sec.
Venturi	VI-VII	Testi anticipa la datazione al V-VI sec.

Tabella 1: Datazione della torre secondo alcuni storici, fonte: "I campanili di Ravenna – Storia e Restauri", Battistini, Bissi, Rocchi – Longo Editore, pag. 24

Il campanile è stato oggetto di diversi restauri dall'1890 al 1916:

Nel 1890 a causa delle forti precipitazioni delle infiltrazioni che danneggiarono la muratura del coronamento provocando la caduta di circa un metro e mezzo di cornice nel lato sud-orientale, venne ricostruita una parte della copertura e ripristinata la cornice caduta.

Nel 1897 in occasione di interventi di manutenzione della basilica si intervenne sul basamento della torre eliminando un antiestetico intonaco di colore rosso apposto in passato scoprendo e riaprendo una finestra a tutto sesto e una sottile feritoia. Venne inoltre chiusa la porta barocca realizzata dai frati Minori Osservanti nel 1512 e riaperta quella originaria con, come disse lo storico Ricci, "evidente rinforzo e abbellimento della torre".

Nel 1912 si aprirono delle fenditure e venne realizzata la prima cerchiatura del campanile all'altezza del primo ordine di bifore riaprendo le finestre degli ordini inferiori. Questo intervento che doveva essere il primo di tre, è stato fortemente criticato da Gaetano Savini in quanto la cerchiatura è stata applicata realizzando una traccia nella muratura e occultandola sotto un nuovo corso di mattoni riducendo di fatto la sezione da circa 1.10 m a circa 0.90 m.

Nella seconda metà del 1915 venne messa in opera una seconda cerchiatura, anch'essa realizzata sotto traccia, della quale non si hanno altre informazioni.

Nel 1916 ad opera del Gerola si realizzò la sostituzione dei solai interni ottenendo un consolidamento tale da permettere la riapertura delle aperture che erano state murate per irrigidire la struttura. Alcune di queste aperture sono

state realizzate mettendo in opera colonne e capitelli realizzati appositamente in quel periodo; anche gli archi delle finestre e le imposte delle sopraccigliature delle trifore risultano a vista più recenti.

1.5 Risultati dell'analisi dei materiali

Nel 1990 è stato fatto un rilevamento dei materiali all'altezza del basamento e del primo piano della torre ottenendo che il paramento murario è costituito da muratura irregolare a corsi orizzontali, 12-13 corsi per metro, ottenuta con l'utilizzo di materiale di reimpiego, con distribuzione non alternata delle differenti tipologie di laterizi e utilizzando anche frammenti di quest'ultimi.

I laterizi, di colore rosso bruno e giallo con inclusi, sono stati lavorati in serie e si trovano in un cattivo stato di conservazione, presentano infatti scagliature e decoesioni.

L'analisi della malta di allettamento ha rivelato che si tratta di malte di calce aerea con aggregato conglomeratici di colore bianco-giallastro con inserti di cocciopesto e frustoli⁶ [S.2, S.3].

⁶ Cocciopesto: materiale edilizio utilizzato come rivestimento impermeabile composto da frammenti di laterizi frantumati e malta fine a base di calce aerea. (<https://it.wikipedia.org/wiki/Cocciopesto>)
Per frustoli si intende "qualsiasi frammento di materia di piccole dimensioni".
(http://dizionari.corriere.it/dizionario_italiano/F/frustolo.shtml)

In Figura 2 si riporta la tabella riassuntiva delle prove di laboratorio [2]

Tabelle riassuntive delle prove di laboratorio eseguite sulle malte di allettamento, di stuccatura o di stilatura.								
Legenda per la composizione mineralogica. A: analcime, C: calcite, CL: clinopirosseno, F: feldspato, L: leucite, M: mica, Q: quarzo.	SANT'APOLLINARE NUOVO cripta (IX sec.)							
	al malta di allettamento		c. aerea	Q=xxxx F=x C=xxx	Sabbia arenacea conglomeratica	x	xxx	1/2.5
Legenda per la granulometria dell'aggregato. Conglomeratico: clasti >2 mm, arenaceo: clasti da 2 mm a 1/16 di mm, siltitico: clasti <1/16 di mm.	campanile (IX-XI sec.)							
	a) malta di allettamento piano terra		c. aerea	Q=xxx F=xxx C=xxx	Sabbia arenacea conglomeratica	Assente	xxx	1/2.5
Legenda per la presenza del cocciopesto. Molto abbondante: xxxx, abbondante: xxx, medio: xx, scarso: x, tracce: Tr.	b) malta di allettamento piano primo		c. aerea	Q=xxx F=xx C=xxx	Sabbia arenacea conglomeratica	Assente	xxx	1/2

Figura 2: Tabella riassuntiva delle prove di laboratorio. Fonte: "I campanili di Ravenna – Storia e Restauri", Battistini, Bissi, Rocchi – Longo Editore, pag. 312

1.6 Arco di Augusto di Rimini [S.4]

L'Arco di Augusto sito a Rimini è stato edificato nel 27 a.C. in Onore del primo imperatore romano Gaio Giulio Cesare Ottaviano Augusto (63 a.C.-14 d.C.), meglio conosciuto come Ottaviano o Augusto, investito dal senato il 16 gennaio 27 a.C. [S.5]

Con Augusto si ha una tipologia monumentale che esce dalla capitale e appare in provincia: l'arco di Rimini ne è un esempio. Questa nuova tipologia monumentale era volta al culto della personalità del principe, per questo alcuni elementi architettonici non rispondono più solo a necessità funzionali ma anche concettuali.

La porta monumentale di accesso alla città di Rimini sorse in luogo dell'antica Porta Romana e si trova all'estremo delle via Flaminia. Il senato decise di dedicarla ad Augusto in seguito alla sua decisione di lastricare a nuovo questa e altre vie d'Italia.

Si osserva che il fornice risulta troppo grande per ospitare una porta: la struttura è infatti larga 15m e alta quasi 17,50m questo perché la politica di Augusto era volta alla pace, periodo noto come “la *Pax Augustea*”, pertanto rendeva inutile una porta che si potesse chiudere. Lo spessore di soli 4,10m fa pensare che l’arco sia stato innestato in uno spazio obbligato inquadrato fra le mura e le due torri.

Un’altra funzione dell’arco era quella di sostenere la grandiosa statua bronzea dell’imperatore in quadriga, ma il riminese Danilo Re, ha avanzato una seconda ipotesi secondo la quale il monumento sarebbe stato coronato dai Bronzi dorati di Cartoceto rappresentanti in questo caso Giulio Cesare, Ottaviano Augusto, Azia maggiore madre di Augusto e infine Giulia minore, madre di Azia e sorella di Cesare.

La merlatura superiore risale al X secolo periodo in cui la città venne tenuta dai Ghibellini.

L’Arco di Augusto è rimasto il principale ingresso alla città fino al periodo fascista quando vennero demolite le mura e l’arco rimase come monumento isolato ritenendo erroneamente che fosse un arco trionfale.

Ai lati dell’arcata sono presenti quattro clipei riportati in Figura 3: i due rivolti verso Roma sono Apollo, la divinità che ha guidato Augusto nella vittoriosa battaglia di Anzio contro Antonio e Cleopatra e Giove, riconoscibile dal fascio di fulmini. Quest’ultimo è rappresentato con un’espressione grave e di qualità scadente, rispetto agli altri per sottolineare l’universalità della *pax augustea* nel nome degli dei.



Figura 3: I quattro clipei sull’Arco di Augusto, dall’alto in senso orario Nettuno, Roma, Apollo e Giove.

Fonte: <http://www.rimini-it.it/img/clipei%20grandi.jpg>

Nei due clipei rivolti verso la città sono raffigurati la personificazione femminile di Roma, riconoscibile

dall'armatura e dalla spada, e il dio del mare Nettuno, raffigurato col classico tridente che fu favorevole ad Augusto nello scontro marino presso Anzio.

In Figura 4 si riporta un dettaglio della facciata dove compare l'iscrizione, ora mutila, che in origine doveva essere:

“SENATUS POPVLVSQVE ROMANVS
IMPERATORI CAESARI DIVI IVLIO FILIO AVGVSTO IMPERATORI
SEPTEM
CONSOLI SEPTEM DESIGNATO OCTAVOM VIA FLAMINIA ET
RELIQVEIS
CELEBERRIMEIS ITALIAE VIEIS ET AVCTORITATE EIVS
MVNITEIS”.



Figura 4: Iscrizione sulla facciata della struttura.

Fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/Arco_di_augusto,_rimini,_esterno_04.JPG

Dal punto di vista costruttivo si osserva che la parte esterna bianca è realizzata con una pietra nota commercialmente come Pietra di Nabresina Roman Stone, si tratta di una pietra calcarea organogena di formazione marina a struttura cristallina fine, abbastanza compatta e cromaticamente omogenea con scarse

venature e inclusioni, facilmente lavorabile e resistente agli agenti atmosferici. Tale elemento è stato disposto in modo da formare, sfruttando dei perni di ferro annegati nel piombo, una sorta di cassaforma variabile tra i 40 e gli 80 cm, all'interno della quale è stata disposta la muratura a sacco.

Molta importanza è stata data alla realizzazione della fondazione del monumento adottando una struttura a platea costituita da materiali lapidei di 3 metri di profondità, 15 metri di lunghezza e 7 metri di larghezza che ha consentito di scongiurare il problema dei cedimenti differenziali particolarmente gravosi in strutture ad elevata rigidità.

1.7 Breve storia dei restauri

Durante la sua storia l'Arco di Augusto ha subito sicuramente molte opere di restauro e non tutti i documenti sono giunti fino a noi ma alcuni interventi come la realizzazione della cortina laterizia con appendici merlate ne sono la testimonianza; tale paramento dev'essere stato impiegato per tamponare il monumento evitando che si smembrasse.

Più recentemente tra il 1936 e il '38 vennero demoliti i resti dei torrioni laterizi medievali a pianta poligona. Questo isolamento ha causato una consistente modifica dell'equilibrio statico del monumento eliminando la benefica spinta di contrasto e gli effetti si mostrano sotto forma di una rotazione, inclinazione e sconnessione della spalla lato mare. Nel 1944 il brillamento di una mina tedesca piazzata sempre alla base del lato mare ha amplificato tale dissesto.

Nel 1947 si è proceduto ad un consolidamento ad opera dell'ingegner Rinaldi con le seguenti opere:

- Cementazioni all'interno dei nuclei murari mediante iniezioni di cemento in pressione a 10-12 atm tramite 22 perforazioni con sonde rotative senza intaccare il rivestimento lapideo
- Sistemazione e ricostruzione della struttura di rivestimento della base minata

Nel 1950 venne deciso di sistemare in un unico conglomerato di laterizi i vari muri di diverse epoche adiacenti all'arco sul lato verso mare in modo da evitare, con uno scivolo per lo scolo delle acque disposto al di sopra del nuovo conglomerato, il problema delle infiltrazioni che avevano lesionato le mura.

Nel 1996-98 ad opera dell'architetto Pier Luigi Foschi è stato eseguito un restauro prevalentemente architettonico volto prevalentemente ad eliminare le incrostazioni superficiali dovute all'inquinamento e all'iniezione nel nucleo strutturale dell'arco di resine consolidanti atte a stabilizzare la muratura a sacco celata dietro il rivestimento lapideo. Quest'ultimo intervento ha permesso di contrastare il trasferimento dei carichi dalla muratura al rivestimento che stava causando le tipiche fessurazioni verticali con espulsione di materiale dovute appunto a crisi per schiacciamento.

1.8 Fontanella nel giardino "Villa Cassarini" [S.6]

La fontanella, Figura 5, non presenta alcun valore storico o artistico ed è stata scelta in quanto le sue dimensioni ridotte hanno consentito un agevole rilievo fotografico anche della parte superiore senza dover ricorrere a costosi rilievi aerei.

La fontanella si trova a Bologna nel giardino pubblico "Villa Cassarini" che si estende lungo i viali di circoscrizione all'altezza di Porta Saragozza. Il parco porta il nome di Alessandro Cassarini che nel 1906 promosse gli scavi archeologici nell'attuale altura del parco dove si trovava l'acropoli di Felsina, la Bologna etrusca.

Nel XVII secolo il colle era occupato da due palazzi, uno dei due edifici era di proprietà della famiglia Pallotti che realizzò il giardino e che successivamente divenne di proprietà Cassarini.



Figura 5: Fontanella del giardino "Villa Cassarini"

Attorno al 1930 la vasta area coi due edifici fu ceduta all'università di Bologna che vi edificò la facoltà di

Ingegneria e di Chimica Industriale. Attualmente il giardino misura circa 7 ettari ed è la parte finale del giardino ottocentesco.

CAPITOLO 2

La progettazione integrata, BIM.

2.1 Introduzione [3]

Nella progettazione di tipo tradizionale si è sempre usato un metodo sequenziale caratterizzato da progetti con livello di dettaglio differente: si parte dal progetto preliminare segue il definitivo fino a giungere all'esecutivo, successivamente c'è la cantierizzazione nella quale convogliano la parte burocratica e quella di costruzione vera e propria e si termina con la manutenzione della struttura. Si ha quindi una continua perdita delle conoscenze accumulate ad ogni passaggio di informazioni e documentazione tra le parti coinvolte come si evince in Figura 6.

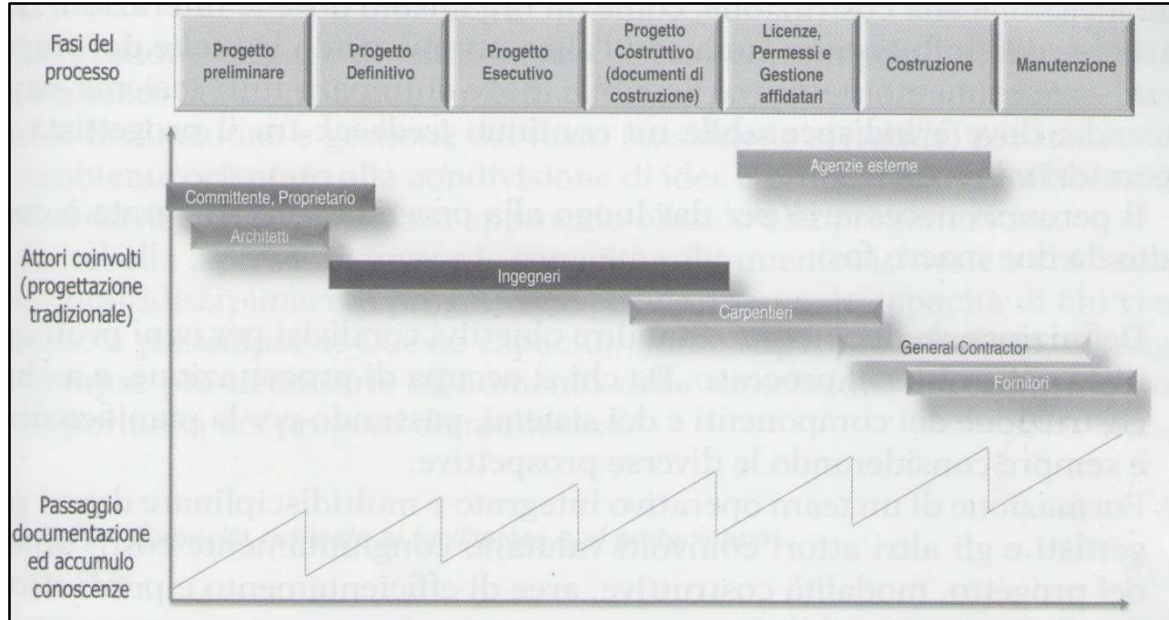


Figura 6: Processo di accumulazione delle conoscenze nella progettazione tradizionale. fonte: *Il Building Information Modeling - BIM*, pag. 41, Caputi - Odorizzi - Stefani, Maggioli Editore

La progettazione integrata che prende il nome di BIM, acronimo di *building information modeling*, punta a rendere più efficiente l'accumulo e la gestione

delle informazioni usando un flusso di lavoro non lineare. Si vuole ottenere una progettazione dove le parti si influenzino l'una con l'altra ottimizzando le scelte in un procedimento iterativo e flessibile come mostrato in Figura 7.

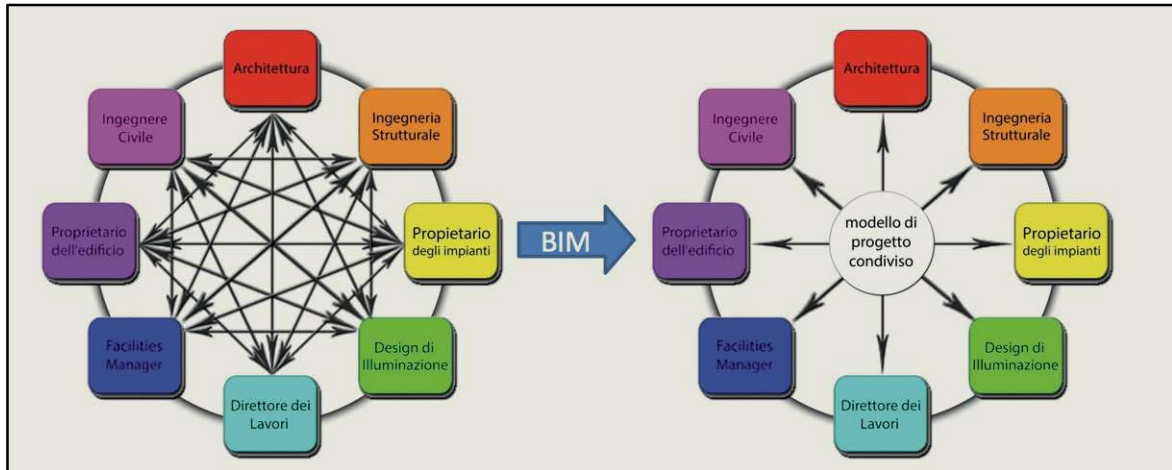


Figura 7: Differenza tra una progettazione tradizionale e una "BIM oriented", fonte: www.ilnuovocantiere.it/ledilizia-di-fronte-a-un-bivio-tecnologico/

In definitiva il BIM si pone di raggiungere i seguenti vantaggi⁷:

1. Progettazione e programmazione

- Ottenere un processo decisionale basato su dati sempre aggiornati
- Ottimizzare la pianificazione e il budgeting
- Un allocamento più efficiente delle risorse
- Riduzione degli errori

2. Costruzione

- Aumento della produttività in cantiere
- Riduzione dei conflitti e delle varianti in corso d'opera
- Aumento della qualità dei prodotti

3. Operatività

- Possesso di una base dati centralizzata
- Possibilità di reportistica completa

⁷ Fonte: Il Building Information Modeling – BIM, Caputi, Odorizzi, Stefani, Maggioli Editore, pag. 47

- Miglioramento della sostenibilità
- Monitoraggio attivo delle decisioni progettuali, degli interventi di cantiere e della pianificazione della manutenzione
- Integrazione con sistemi innovativi (ad es. laser scanner e droni)
- Gestione tempestiva degli interventi di emergenza

Si osserva che il processo di digitalizzazione non deve però cominciare da zero, infatti la maggior parte delle informazioni riguardanti strutture ed edifici sono già in formato digitale tuttavia spesso il passaggio di informazioni tra i soggetti avviene in formato cartaceo o in pdf sia per paura di vedere copiato il proprio *know-how* sia per paure di responsabilità dovute a modifiche apportate da altri soggetti e non comunicate. È quindi necessario introdurre una normativa che gestisca la proprietà delle informazioni e un sistema che sia in grado di comunicare automaticamente le modifiche o consentirle solo previa autorizzazione.

Il BIM quindi **non** è una tecnologia che definisce il processo di business in base alle competenze del fornitore del software ma è una **metodologia** di lavoro resa possibile dalle nuove tecnologie che permette di decidere riguardo le scelte di lavoro (*workflow*), con quali risorse (competenze interne o esterne, organizzazione), con quali sistemi (infrastruttura tecnologica, base dati).

In Figura 8 è mostrato il processo di accumulo delle conoscenze nella progettazione integrata.

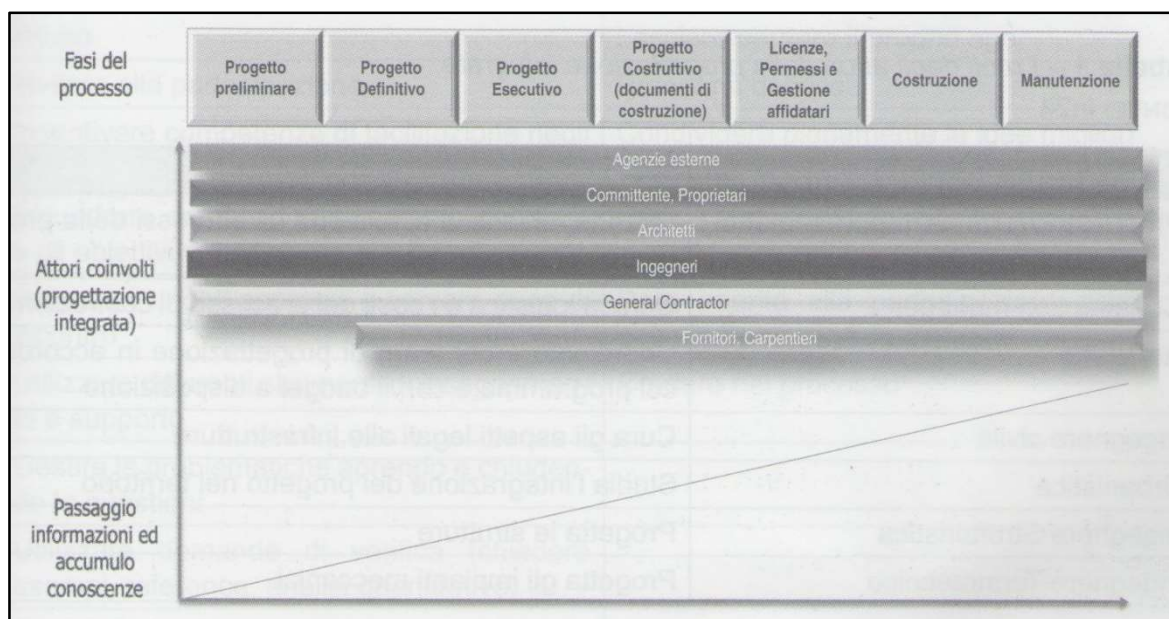


Figura 8: Processo di accumulo delle conoscenze nella progettazione integrata. fonte: Il Building Information Modeling - BIM, pag. 41, Caputi - Odorizzi - Stefani, Maggioli Editore

2.2 Operatività [3]

2.2.1 Il BIM Manager

Nell'ottica di articolare al meglio il lavoro nasce l'esigenza di definire una nuova figura, il BIM Manager: il suo compito è quello di aggiornare tempestivamente le parti coinvolte (proprietà, progettisti, costruttori e gestori della struttura) e di coordinarle al meglio attivando un'ottima interoperabilità.

Le fasi iniziali della progettazione sono quelle più importanti dove il BIM Manager deve chiarire le iniziali problematiche riguardo la condivisione degli obiettivi e i modi per raggiungerli affrontando temi come l'organizzazione delle piattaforme BIM da utilizzare, l'origine comune dei lavori, il formato dei file di scambio, e la gestione delle comunicazioni tra i differenti team.

2.2.2 Il livello di sviluppo LOD

È stato quindi chiarito che il *workflow* BIM (flusso di lavoro) non è lineare e che i progettisti si trovano a lavorare a stretto contatto con tutti i soggetti coinvolti nel progetto. Esiste comunque una progressione del lavoro da uno stato preliminare o volumetrico ad uno dettagliato o esecutivo. All'aumentare degli attributi e delle caratteristiche corrisponde quindi un aumento del *Level Of Development – LOD* (livello di sviluppo).

Possiamo distinguere cinque LOD:

LOD 100: è quello relativo alla fase decisionale, dove si ha una modellazione concettuale usando masse e volumi semplificati e gli elementi sono disegnati senza spessore. Permette un'analisi energetica di massa e dei costi.

LOD 200: è quello relativo alla progettazione preliminare, dove si ha il modello composto da elementi rappresentati graficamente come generici oggetti (o come un sistema assemblato di elementi) dotati di spessore con il conseguente computo quantitativo.

LOD 300: è quello relativo alla fase esecutiva, dove ogni elemento è rappresentato graficamente come uno specifico sistema (o assemblaggio di elementi) con informazioni dettagliate riguardo a forma, grandezza e collocazione. Abbiamo quindi la rappresentazione multistrato degli elementi e

un computo quantitativo in base a spessori e materiali; permette quindi di realizzare analisi energetiche.

LOD 400: è il livello relativo alla fase di disegno esecutivo, con informazioni riguardanti l'aspetto metodologico delle fasi di assemblaggio, i mezzi costruttivi, i costi basati su dati reali di acquisto, possiede quindi tutti i dati utilizzati in fase di gara d'appalto.

LOD 500: è il livello relativo alla fase di costruzione dove si giunge ad un dettaglio di informazione ancora maggiore associando ad ogni elemento indicazioni come la reale data di fornitura. Il computo estimativo degli elementi è dettagliato ed è possibile realizzare controlli di costruzione, gestione e manutenzione.

È importante distinguere il LOD (*Level Of Development*) dal LoD (*Level of Detail*); è infatti possibile associare ad ogni livello di sviluppo una serie di attributi, cioè informazioni non grafiche, che possono popolare gli oggetti BIM in funzione della fase progettuale. In Figura 9 viene riportata una tabella che mostra quanto detto: all'aumentare del LOD l'oggetto, in questo caso una parete, si arricchisce di dettagli non grafici quali composizione/materiale, presenza di certificati, trasmissione acustica etc.

Non si può pensare ad un oggetto BIM che non abbia nei suoi LOD più elevati una serie di informazioni non grafiche aggiunte (gli attributi).

Proprio questa caratteristica rende la sequenza dei LOD unica e non confondibile con il dettaglio puramente grafico.

LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 350	LOD 400
Geometria Elemento architettonico verticale rappresentato mediante un simbolo 2D.	Geometria Solido generico per rappresentazione elemento architettonico verticale con forma, spessore e posizione approssimata	Geometria Elemento architettonico verticale rappresentato con ingombri calcolati secondo la normativa tecnica	Geometria Elemento architettonico verticale rappresentato mediante un solido avente dimensioni pari alle dimensioni reali. Sono modellate tutte le stratigrafie.	Geometria Elemento architettonico verticale rappresentato mediante un solido avente dimensioni pari alle dimensioni reali. Sono incluse tutte le stratigrafie, i dati specifici del fornitore dei materiali e le finiture.
Rappresentazione Grafica 2D (linee e campiture 2D)	Rappresentazione Solido 3D	Rappresentazione Solido 3D strutturato	Rappresentazione Solido 3D complesso	Rappresentazione Solido 3D complesso
Attributi Posizionamento di massima	Attributi Semplici geometrie d'ingombro	Attributi Definizione del sistema architettonico <ul style="list-style-type: none"> • Spessore • Lunghezza • Larghezza • Volume • Definizione materiali • Definizione delle stratigrafie principali 	Attributi Dettaglio dei componenti per gruppi e senza riferimenti a singoli prodotti <ul style="list-style-type: none"> • Definizione stratigrafie dettagliate • Spessori componenti • Struttura • Isolamento • Camera d'aria • Sottofondo supporto • Finitura • Dettagli costruttivi 	Attributi Dettaglio dei componenti con singolo prodotto. Informazioni di montaggio. Schede tecniche singoli prodotti: <ul style="list-style-type: none"> • Tipo finitura interna • Superficie finitura interna • Tipo finitura esterna • Superficie finitura esterna • Composizione Materiale/Componente • Presenza certificazioni • Capacità strutturale • Trasmissione acustica

Figura 9: Differenza tra LOD, livello di sviluppo, e LoD, livello di dettaglio. Il livello di dettaglio aumenta all'aumentare degli attributi associati all'oggetto. fonte: <http://www.harpaceas.it/il-bim-e-il-concetto-di-dettaglio-e-lod/>

2.2.3 Le dimensioni del BIM

Un altro concetto importante riguarda le **dimensioni del BIM**.

Quando si parla di **BIM 3D** si intende un modello tridimensionale realizzato con strumenti BIM in cui grazie alla parametricità degli elementi è possibile trasferire informazioni ai diversi soggetti andando oltre alla semplice modellizzazione. Si ottiene quindi un plastico virtuale della struttura e il cosiddetto *clash detection* ovvero l'analisi preventiva dei conflitti geometrici tra i vari elementi nel modello.

Nel **BIM 4D** si introduce il tempo delle varie fasi di costruzione potendo quindi ottenere una migliore pianificazione e il *time management*.

Si passa quindi al **5D** in cui ad ogni elemento vengono assegnati i costi potendo calcolare il computo delle quantità, il computo estimativo e i costi di vita del progetto.

Il **6D** è la dimensione relativa al *Facility Management*, quindi alla gestione del costruito infatti, se il modello BIM è corretto e aggiornato, si possono ricavare una grande quantità di informazioni relative alla gestione degli spazi e all'uso efficiente dell'energia.

Infine si ha la settima dimensione, **7D**, in cui il modello BIM dialoga direttamente coi programmi di analisi energetica per una più efficiente sostenibilità ambientale.

2.2.4 La gestione temporale delle attività e dei costi

Il BIM Manager ha a disposizione diversi strumenti che gli consentono di gestire in maniera ottimale il lavoro.

Il primo è il *WBS – Work Breackdown Structures* (struttura di scomposizione del lavoro) che è l'elenco di tutte le attività di un progetto riportate come albero gerarchico e ha lo scopo di gestire al meglio le fasi, le attività e le attrezzature utilizzate servendosi della “Regola del 100%” in cui la somma di ogni ramificazione di fase o attività deve risultare appunto 100%.

La WBS può essere utilizzata per pianificare tempi, costi e utilizzo delle risorse, i costi generali del progetto ed elaborare la parti critiche di un progetto.

Dalla WBS si genera un'articolazione in elementi più piccoli detti *WBE – Work Breackdown Elements*. Ogni WBE contiene tutte le informazioni che permettono di definire chi è responsabile della singola attività.

Il secondo strumento è l'*OBS – Organization Breackdown Structures* che è la definizione precisa delle responsabilità di progetto e riflette il modo in cui il progetto è funzionalmente organizzato, ad esempio con un diagramma PERT.

Il tutto converge nella *RAM – Responsibility Assignment Matrix*, che è una matrice in cui le righe sono le OBS e le colonne le WBS ottenendo che le risorse disponibili siano correlate.

Come è già stato detto l'introduzione della variabile tempo porta il modello nella quarta dimensione (4D) che quindi introduce nella progettazione la disciplina della simulazione, che non dev'essere per forza in grado di produrre un video che illustri l'andamento del lavoro nel tempo. La simulazione consente di relazionarsi con i più diffusi software 5D permettendo di analizzare e assegnare le quantità esatte del modello BIM ai prezziari valutando in tempo reale le varianti proposte. È quindi possibile fornire risposte strategiche ad ogni cambio di progettazione ma anche suggerire adeguamenti più efficaci

2.2.5 La gestione del patrimonio costruito, il BIM 6D

Il *Facility Manager* è la figura preposta alla gestione del costruito ed è importante che abbia molteplici competenze tra cui: comunicazione, gestione delle emergenze e garanzia di continuità di business, sostenibilità e attenzione all'ambiente, gestione degli aspetti di finanza e *business planning*, *leadership*, elaborazione di strategia, *project management*, controllo di qualità, identificazione di nuove tecnologie.

Per gestire tutte queste attività oggi si utilizzano i sistemi CAFM che si sono però rivelati poco efficaci in quanto sono focalizzati principalmente sulla gestione degli spazi e puntano principalmente su aspetti quotidiani dell'operatività, con un elevato costo di ottenimento delle informazioni, una difficoltà a tenerle aggiornate ed infine hanno limitazioni nella gestione di grafici a applicazioni data centriche.

Con la metodologia BIM le informazioni importanti sono estratte in un unico formato standard che prende il nome di *COBie – Construction Operations Building information exchange* portando numerosi vantaggi nella pianificazione, nella gestione dei dati e nella operatività.

2.3 Modellazione [3]

2.3.1 BIM Authoring

Il *Building Information Model*, da non confondere con il *Building Information Modeling* che è una procedura, è un modello virtuale, grafico, tridimensionale composto da dati e geometrie riguardanti la progettazione di una specifica disciplina progettuale. Nell'ambito delle progettazioni civili ed edili si fa riferimento a quattro discipline fondamentali cui fanno riferimento altrettanti modelli di progetto che prendo il nome di **BIM Authoring**:

- Disciplina Architettonica
- Disciplina Strutturale
- Disciplina Impiantistica
- Disciplina Infrastrutturale

Per le altre discipline progettuali non è necessario ridefinire il modello grafico geometrico.

Quando si parla di “*BIM platforms*” ci si riferisce quindi ad applicazioni che fanno riferimento ad una *BIM Authoring*, mentre le applicazioni necessarie alle altre discipline (ad es. cronoprogramma, simulazione energetica, calcolo strutturale, gestione della sicurezza etc.) vengono considerate come strumenti operativi e prendono il nome di **BIM Tools**.

Possiamo definire tre diverse tipologie di software:

Authoring Software, sono le applicazioni in grado di generare modelli virtuali adeguati per l'ambito di utilizzo specifico; difficilmente questo software sarà soddisfacente e di alto livello per più di una disciplina operativa.

Processing Software, sono applicazioni (spesso tabellari) pensate per coordinare e organizzare i flussi di lavoro come la contabilità, wbs, logistica e gestione dei processi, dei materiali e della documentazione.

Reviewing Software, sono applicazioni multidisciplinari per analizzare l'avanzamento del progetto: si dividono in **model checking** per il controllo dei modelli e in **code checking** per verificare che il progetto rispetti le particolari normative.

2.3.2 Model Checking

I software per il *model checking* si pongono l'obiettivo di garantire che gli standard di qualità siano rispettati verificando e validando in modo automatico sia i modelli relativi alle singole discipline sia cercando criticità, sovrapponendo i modelli afferenti dai tecnici delle diverse discipline, riducendo i problemi e quindi i costi di messa in opera. Una tipica criticità derivante dal confronto dei modelli delle diverse parti è il controllo delle collisioni noto anche come *clash detection*. Dovendo interagire con modelli creati in ambienti diversi risulta necessario che tutti i file giungano rispettando lo standard ICF e che al suo interno non vengano modellati direttamente nuovi elementi. Il software dovrà redigere un report dinamico che consenta, una volta che il modello verrà aperto dal tecnico competente, di indirizzarlo automaticamente sull'elemento da correggere visualizzando tutti i dettagli necessari.

I controlli standard di questi programmi si basano su un set di regole che controllano qualità e completezza fin dalla fase preliminare di progettazione ad esempio verificando per il livello dimensionale gli elementi strutturali e impiantistici oppure, per il livello numerico, la presenza di aperture o di spazi liberi attorno ad un elemento per garantirne la fruibilità. È inoltre possibile personalizzare tali regole comprendendo le possibili necessità che una stazione appaltante possa avere nei confronti di sub appalto a terze parti.

Alcuni di questi programmi sono in grado di allegare riferimenti a file esterni producendo così documentazioni tecniche di progetto utili sia in fase decisionale che da allegare in fase di controllo agli uffici tecnici.

2.3.3 Code Checking

Si tratta del calcolo automatizzato della rispondenza del progetto alle normative di riferimento ad esempi possono essere verificate le prescrizioni edilizie, antincendio, isolamento acustico etc.

I modelli esportati in formato ICF contengono gli attributi precedentemente inseriti dal progettista che consentono al software di ottenere una classificazione degli elementi 3D assegnando loro una caratteristica comune che consente poi il funzionamento della verifica tramite una regola: ad esempio inserendo per ogni elemento la sua resistenza REI si è in grado di ottenere

un'analisi della compartimentazione degli spazi verificandone la corrispondenza normativa.

Anche in questo caso oltre alle regole preimpostate è possibile crearne di nuove e personalizzarle in funzione del risultato che si desidera ottenere.

2.4 Il BIM Strutturale integrato con il calcolo FEM [3]

Il calcolo strutturale è quell'insieme di attività finalizzate a determinare la risposta dinamica e/o statica delle strutture e la progettazione, verifica e ottimizzazione di elementi strutturali. I primi codici di calcolo automatico rappresentavano la struttura in forma matriciale anche senza l'utilizzo di interfacce grafiche utilizzando istruzioni testuali e numeriche mentre quelli moderni risultano più pratici permettendo di creare un modello tridimensionale della struttura. È quindi evidente l'interesse di poter mettere in comunicazione un modello BIM Strutturale con un software agli elementi finiti FEM.

Generalmente il funzionamento dei software di analisi strutturale sono schematizzabili in tre fasi:

- pre-processing: è la parte dove si esegue la modellizzazione della struttura inserendo dimensioni, materiali, vincoli, carichi e masse.
- Solutore agli elementi finiti: è la parte dove il modello viene convertito in un sistema matriciale che verrà poi risolto.
- Post-processing: è la fase in cui il progettista, dopo una critica valutazione dei risultati, procede con la progettazione e verifica degli elementi.

Se il modello strutturale viene ricavato utilizzando software BIM è necessario estrapolare gli elementi strutturali dalla totalità degli oggetti che costituiscono il modello architettonico. Ad oggi questo sistema funziona bene se applicato a sistemi a telaio mentre è più difficile la gestione di oggetti bidimensionali come setti sismici, vani scala ed ascensori, maschi murari etc. e ancora peggio per elementi bidimensionali a singola o doppia curvatura.

La struttura dei dati e il linguaggio utilizzato per assemblare gli elementi ovviamente varia tra i diversi codici di calcolo, quindi per trasferire tali informazioni si presentano diverse possibilità:

- La prima consiste nello scrivere manualmente un file di *input* utilizzando il linguaggio del programma, tuttavia sempre più *software house* non consentono di accedere al *database* del modello cercando di favorire un'interazione grafica.
- La seconda possibilità è quella di utilizzare un formato file di scambio che per i modellatori BIM è l'**IFC** acronimo di *Industry Foundation Classes*. Questo formato di interoperabilità si pone l'obiettivo di fissare degli standard per oggetti comuni sia per ottimizzare la produttività che per minimizzare la perdita di informazioni durante i trasferimenti tra le diverse piattaforme.

Il formato ICF è molto ben strutturato per il settore architettonico ed impiantistico mentre risulta molto schematico riguardo la rappresentazione del modello analitico non disponendo di informazioni dedicate al modello di calcolo che deve estrapolare uno schema congruente agli elementi finiti. Non c'è quindi uno standard dati che consenta di eseguire ad esempio un'analisi strutturale con un software e la progettazione dell'elemento o il computo metrico con un altro.

Un formato comune consentirebbe una più agevole post-elaborazione dei dati e consentirebbe a delle *software house* di specializzarsi in modo mirato su questa fase senza dover supportare lo sviluppo di tutto l'iter progettuale. L'Associazione Italiana Software Tecnico "AIST" si propone di ampliare il formato IFC per avere una completa descrizione del modello strutturale e di proporlo all'organizzazione *BuildingSmart* che cura lo standard IFC. L'aggiornamento di questo standard non è però cosa semplice è infatti necessario risolvere innanzitutto un problema geometrico dovendosi descrivere un elemento 3D come elemento 1D congruente con gli elementi adiacenti

Il passaggio di informazioni può avvenire automaticamente in forma "interno-diretto" nel caso si utilizzi un software in grado di assolvere a funzionalità di differenti discipline oppure in forma "diretto-proprietario" nel caso si utilizzino differenti software dello stesso produttore, cioè con lo stesso formato proprietario.

Si può dire quindi che il modello di calcolo è "costruito dal basso" quando viene realizzato direttamente nel software dedicato al calcolo strutturale, mentre nell'ottica BIM è detto "costruito dall'alto" quando cioè le informazioni necessarie vengono estrapolate dalla totalità degli elementi

presenti nel modello architettonico. Questa operazione come detto può essere complessa visto che bisogna riorganizzare gli oggetti prestando attenzione a:

- Determinare gli oggetti strutturali portanti
- Ripristinare la congruenza
- Posizionare gli oggetti

Il primo punto risulta intuitivo, in questa fase bisogna discernere gli elementi in grado di svolgere la funzione strutturale dagli altri, mentre per il secondo punto bisogna notare che il modellatore BIM vede gli oggetti nella loro interezza e le intersezioni risultano solo una rappresentazione grafica mentre strutturalmente essa deve essere rappresentata in automatico creando il corretto numero di elementi finiti che dovranno essere congruenti agli elementi finiti adiacenti. Infine la terza fase è fondamentale per poter risolvere il problema dei disassamenti dovuti alle differenti dimensioni degli elementi; il classico esempio è la possibilità di spostare il nodo di calcolo senza spostare l'oggetto solido da cui proviene. In questa fase risultano decisive le possibilità di visualizzazione e di manipolazione degli oggetti in un'anteprima.

CAPITOLO 3

Geomatica

La geomatica è la disciplina che si occupa della gestione automatizzata dell'informazione relativa al territorio. L'obiettivo di questa disciplina è di trattare grandi quantità di dati e di informazioni di diversa natura e di organizzarli, elaborarli, gestirli e rappresentarli in cartografie digitali e numeriche per ottenere una buona conoscenza della situazione territoriale. Oltre all'informatica, le discipline afferenti alla geomatica sono la cartografia, la geodesia, la topografia, il telerilevamento, il posizionamento satellitare, i sistemi informativi territoriali, la fotogrammetria e la scansione laser. In questo capitolo ci si soffermerà sugli ultimi due in quanto costituiscono la base su cui si fonda questo lavoro di tesi.

3.1 Fotogrammetria [4]

La fotogrammetria si occupa di determinare la forma e la dimensione di oggetti attraverso l'acquisizione di immagini sfruttando la proiettività che rappresenta la relazione tra spazio 2D e 3D. La relazione fra coordinate immagine e coordinate oggetto è definita dalle equazioni di collinearità che si ottengono dalla formulazione di una trasformazione conforme

$$\bar{X} - \bar{X}_0 = \lambda \cdot R \cdot (\bar{x} - \bar{x}_0) \quad (1)$$

\bar{X}	vettore delle coordinate oggetto
\bar{X}_0	vettore delle coordinate oggetto del centro di proiettività
λ	fattore di scala esprimibile come $\frac{\bar{z}_0}{c}$ con c la distanza focale della camera
R	matrice di rotazione spaziale funzione delle rotazioni elementari ω , φ , κ
\bar{x}	vettore delle coordinate immagine
\bar{x}_0	vettore delle coordinate immagine del centro di proiettività

Si ha quindi una trasformazione a 7 parametri, $\bar{X}_0, \bar{Y}_0, \bar{Z}_0, \omega, \varphi, \kappa, \lambda$.

La (1) può essere scritta come

$$\begin{vmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{vmatrix} R \begin{vmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{vmatrix} \quad (2)$$

Si può quindi dire che ad ogni punto oggetto corrisponde solo un punto immagine mentre ad un punto immagine corrispondono infiniti punti oggetto, è quindi necessario avere informazioni su Z oppure due immagini dello stesso oggetto.

In definitiva per definire la trasformazione tra coordinate immagine e oggetto sono necessari 9 parametri che vengono distinti in:

Parametri dell'Orientamento Interno (P.O.I.): x_0, y_0, c

Parametri dell'Orientamento Esterno (P.O.E.): $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$

Questi parametri sono fondamentali per la ricostruzione metrica dell'oggetto. La posizione e l'assetto dei fotogrammi viene ricostruita individuando dei punti fotogrammetrici di appoggio, cioè punti a coordinate note.

3.1.1 Orientamento interno di una camera metrica

Con le equazioni di collinearità si è definita una corrispondenza rettilinea tra i punti oggetto e i punti immagine ipotizzando che le rete proiettive si intersechino tutte nel punto O detto centro di proiezione, Figura 10.

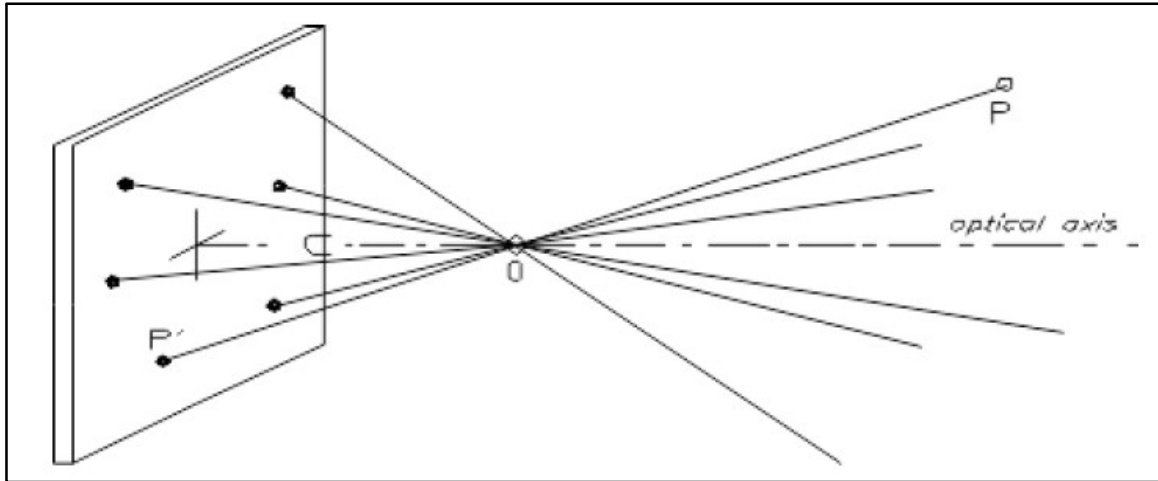


Figura 10: Rette proiettive e centro di proiezione O. fonte: Appunti di fotogrammetria, Prof. Antonio Zanutta, pag. 5

In questo modello ideale gli unici parametri di orientamento interno sono la distanza focale c e le coordinate immagine del punto principale che è il punto in cui si intersecano il piano di proiezione con la perpendicolare condotta dal centro di proiezione. Nel caso reale è necessario invece tenere in considerazione gli inevitabili errori dovuti all'obiettivo, alla camera e al fotogramma.

In un sistema ottico ideale i due piani ottici principali, H per lo spazio-oggetto e H' per lo spazio-immagine, sono tra loro perfettamente paralleli e per il caso aria-vetro-aria si ha che i due punti ottici principali (intersezione tra asse ottico e piani principali) coincidono con i due punti nodali N e N' . I raggi centrali passanti per i punti nodali formano con l'asse ottico lo stesso angolo τ inoltre la distanza principale c coincide con la distanza immagine s' , Figura 11.

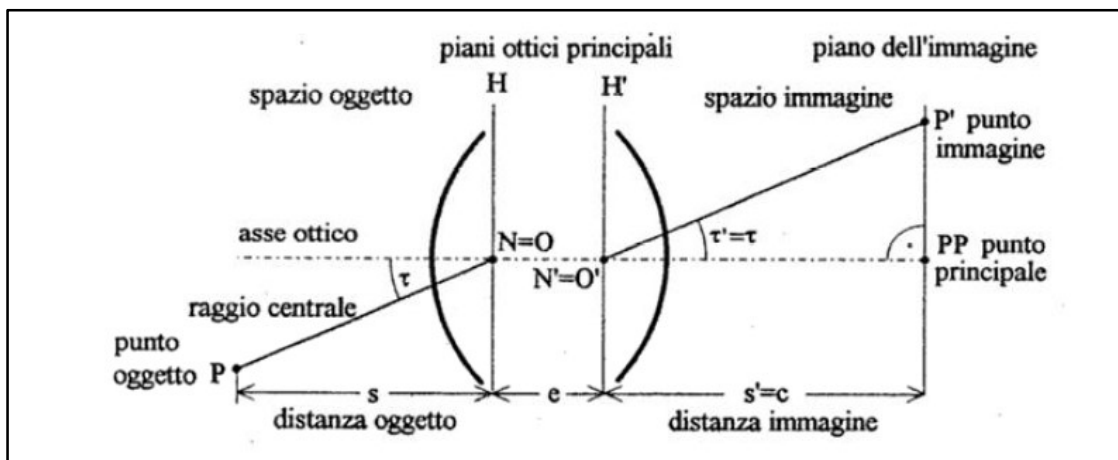


Figura 11: caso ideale di formazione dell'immagine. fonte: Appunti di fotogrammetria, Prof. Antonio Zanutta, pag. 6

Nel caso reale si ha invece che:

- Gli obiettivi sono solitamente molto spessi e asimmetrici e le lenti sono ricavate da diversi tipi di vetro ottico. Il diaframma, che non è al centro dell'obiettivo, limita l'effettivo fascio di raggi che formano il punto immagine ottenendo un'immagine apparente chiamata **pupilla di entrata EP** e analogamente si ha la **pupilla di uscita EP'** nello spazio-immagine dell'obiettivo. Questo implica che la posizione del centro di proiezione O vada determinata.
- Inoltre l'asse ottico dovrebbe contenere i centri di tutte le superfici sferiche ma a causa di imprecisioni nell'incollaggio e assemblaggio delle lenti e dell'obiettivo si saranno accumulati una serie di piccoli errori che portano a non avere più l'asse ottico come asse di riferimento fotogrammetrico e si avrà quindi un raggio principale PRa calibrato che sarà perpendicolare al piano immagine nello spazio oggetto e passerà per il centro della EP il cui prolungamento interseca il piano immagine nel punto principale di autocollimazione PPA.
- La pupilla di ingresso generalmente non giace sul piano principale H, ne segue che τ e τ' sono diversi.
- La distanza principale s_m' definita dal telaio del piano focale della camera differisce dalla distanza principale ottica s' .
- Infine il piano immagine non è rigorosamente perpendicolare all'asse ottico.

Possiamo definire quindi un **centro di proiezione matematico** O_m collocato perpendicolarmente al piano immagine ad una distanza c dal PPA in modo da riprodurre gli angoli τ il più fedelmente possibile. Gli errori residui vengono attribuiti alla **distorsione ottica** $\Delta\rho$, Figura 12.

$$\rho = c \cdot \tan\tau + \Delta\rho \quad (3)$$

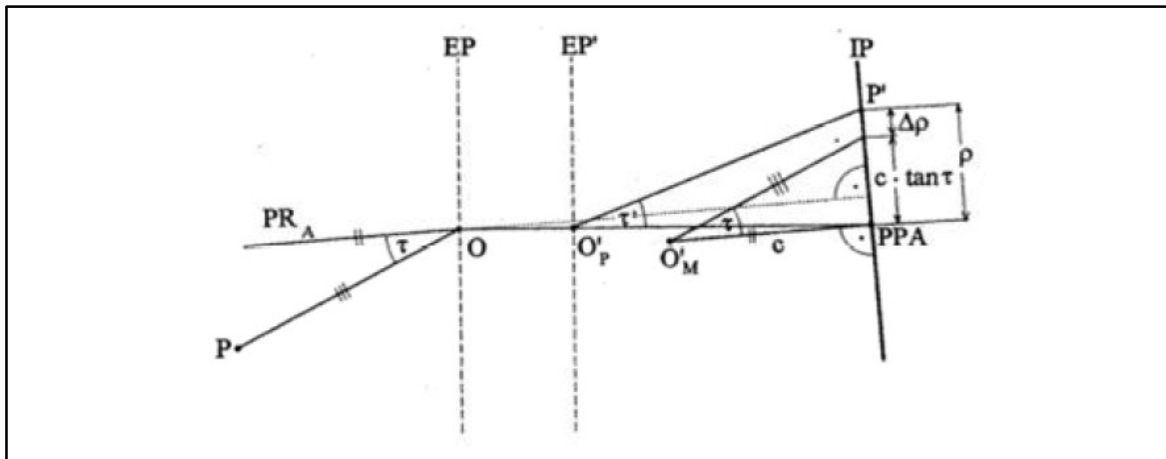


Figura 12: Caso reale di formazione dell'immagine. fonte: Appunti di fotogrammetria, Prof. Antonio Zanutta, pag. 8

Le camere fotogrammetriche possono essere calibrate in laboratorio usando un goniometro ottico oppure a mezzo di opportuni software. Negli obiettivi moderni si è osservato che la distorsione è praticamente trascurabile, e viene considerata solo per la fotogrammetria analitica di precisione.

Possiamo avere tre tipi di distorsione, Figura 13:

- Distorsione simmetrica detta "a barilotto", essendo simmetrica è facilmente eliminabile
- Distorsione asimmetrica detta "a cuscinetto"
- Distorsione casuale ad esempio a causa di una bolla d'aria che curva la pellicola; è una distorsione molto grande.

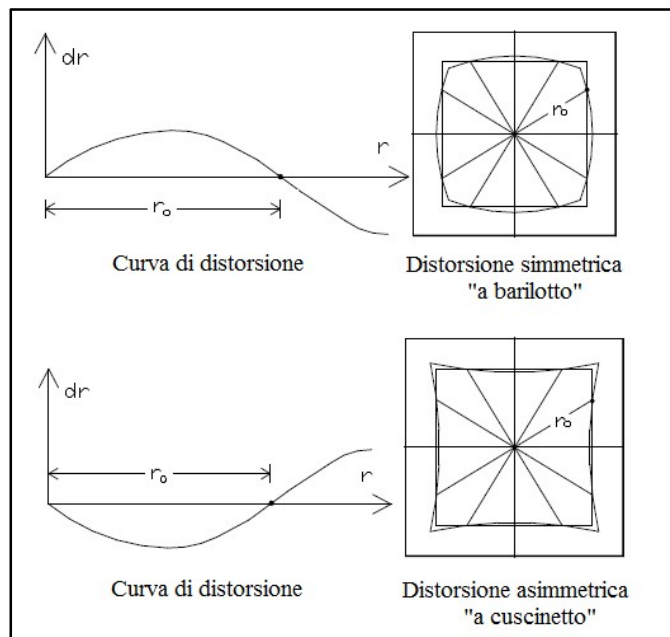


Figura 13: Distorsione simmetrica e asimmetrica. fonte: Appunti di fotogrammetria, Prof. Antonio Zanutta, pag. 25

Il sistema di coordinate immagine e il relativo centro di presa vengono determinati utilizzando su ogni fotogramma le marche fiduciali; l'intersezione

delle rette passanti per le coppie di marche fiduciali opposte definisce il **centro fiduciale FC**.

In un certificato di calibrazione di una camera fotogrammetrica si possono trovare le seguenti informazioni:

- Le coordinate immagine delle marche fiduciali (ed eventualmente le distanze fra le marche)
- Le coordinate del punto principale di autocollimazione PPA, del punto principale di simmetria PBS (punto dato dall'intersezione del raggio principale di simmetria con il piano immagine) e del centro fiduciale FC.
- La distanza principale c
- La curva di distorsione media radiale
- La data della calibrazione
- Informazioni sulla risoluzione dell'immagine

Le camere sono sensibili agli urti e agli sbalzi di temperatura questo rende necessaria la loro costante calibrazione.

3.1.2 La fotogrammetria digitale

La fotogrammetria digitale [5] sostituisce alle classiche fotografie su pellicola quelle ottenute con supporti digitali e memorizzate sotto forma di numeri. Il software, al contrario di quanto avviene con il metodo analogico, è in grado di eseguire automaticamente la scelta dei punti omologhi attraverso l'uso di algoritmi di *image matching* permettendo di ridurre i costi e rendendo questa tecnologia accessibile ad una più ampia base di utenza.

L'immagine viene descritta come una funzione $g(x,y)$, con x e y variabili nello spazio, dove la variabile dipendente esprime il contenuto radiometrico che può essere ad esempio il valore B/N (bianco o nero), un livello di grigio o un valore RGB (rosso, verde, blu).

L'immagine non può essere descritta come una funzione analitica chiusa è quindi necessario trovare una funzione discreta che la rappresenti, questo processo è detto *digitizing* e permette di rappresentare l'immagine come una matrice $g(x,y)$ di elementi areali finiti, *pixel*.

$$g(x,y) = \begin{vmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \dots & g(0, C - 1) \\ g(1,0) & g(1,1) & \dots & g(1, C - 1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(R - 1,0) & g(R - 1,1) & \dots & g(R - 1, C - 1) \end{vmatrix} \quad (4)$$

con:

x indice colonna che va da 0 a C-1, C è il numero massimo di colonne

y indice riga che va da 0 a R-1, R è il numero massimo di righe

g(x,y) valore di grigio {0,1,...max}

Ad ogni *pixel* viene associato un valore DN, *digital number*, che rappresenta la radiometria di quella porzione di immagine. Per il DN vale la relazione:

$$DN = 2^{(n \text{ bit})} \quad (5)$$

dove “n bit” è il numero di bit a disposizione all’aumentare dei quali è quindi possibile rappresentare un numero sempre maggiore di livelli di radianza; ad esempio nel caso più semplice con 2 bit è possibile rappresentare un’immagine in bianco e nero mentre con 24 bit si hanno più di 16milioni di colori dove i pixel a radianza minore, e quindi a DN minore, rappresentano i toni più scuri.

Se si vuole rappresentare la radianza di un’immagine in bianco e nero in toni di grigio è quindi sufficiente un numero compreso tra 0 (nero) e 255 (bianco) occupando 8 bit, $2^8 = 256$, che corrispondono ad 1 byte.

Nel caso di immagini a colori si hanno due modi di rappresentare la radiometria, la prima è la modalità “*True Color RGB*” e l’altra è la “modalità colore tavolozza”.

La modalità *True Color RGB* prevede che ogni colore sia la sovrapposizione di tre colori fondamentali additivi rosso, verde, blu, si ha quindi un valore compreso tra 0 e 255 per ognuno dei tre colori. Questo comporta che l’immagine sia a tre piani cioè costituita da tre matrici rappresentabili come

$$G_c = \{g_1(x, y), g_2(x, y), g_3(x, y)\} \quad (6)$$

dove g_1, g_2, g_3 possono essere i tre livelli RGB e di conseguenza si avrà bisogno di 3 *byte* per ogni *pixel*.

Esistono anche immagini multicanali fondamentali nei sistemi di rilevamento mobili (*mobile mapping system*) dove si possono avere n funzioni del tipo $g_n = (x, y)$ ad esempio in una sequenza video le immagini sono funzione anche nel tempo.

La modalità tavolozza consente di avere immagini di dimensioni ridotte andando a selezionare dalla stessa solo i 256 colori che meglio la rappresentano. In questo caso la radianza del *pixel* è quindi rappresentata da 1 *byte* soltanto e l'immagine contiene meno dati dell'originale.

Per gli scopi fotogrammetrici è necessario definire la relazione che si instaura tra la posizione del *pixel* e le coordinate immagine. L'origine del sistema di riferimento dell'immagine è posto a mezzo pixel di distanza dalla matrice immagine, in questo modo le coordinate immagine del centro di un pixel si ottengono moltiplicando il numero di indice per la dimensione del pixel come mostrato in Figura 14.

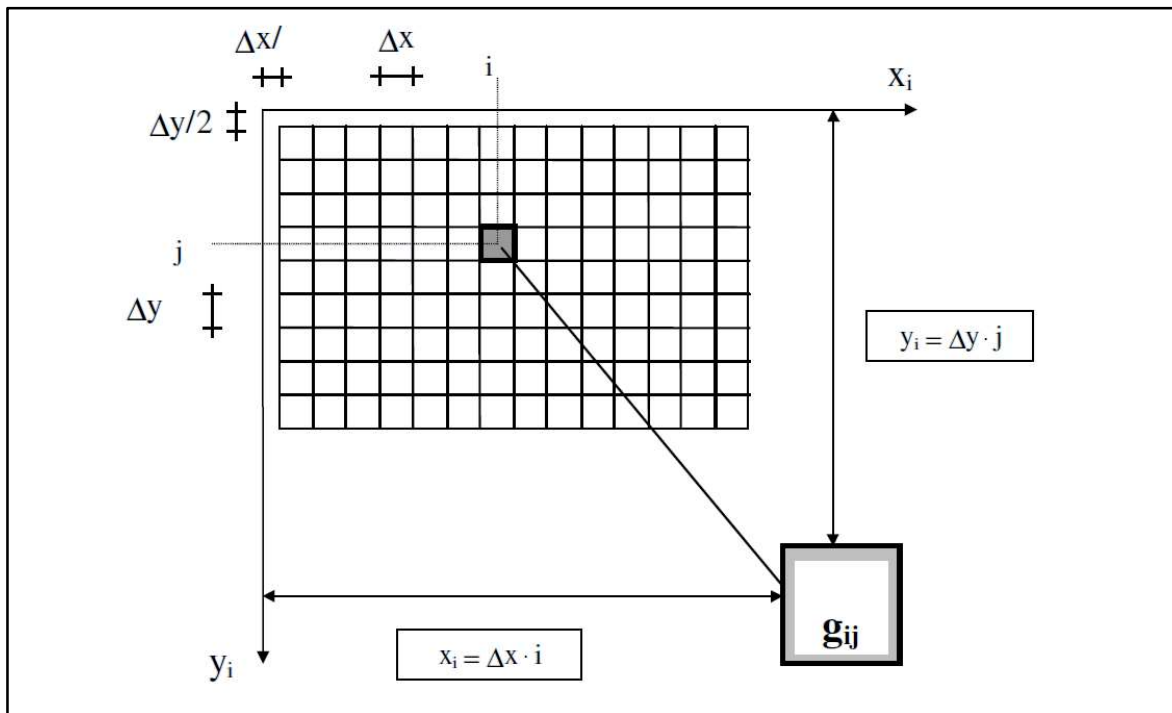


Figura 14: Sistema di coordinate immagine in un'immagine digitale. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 10

La dimensione di un pixel, d_{pix} , viene in genere indicata come densità di campionamento in punti per pollice con l'acronimo dpi, dall'inglese *dots per*

inch, e definisce la risoluzione. Ricordando che un pollice corrisponde a 25400 μm si ha:

$$d_{pix} = \frac{25400}{dpi}; \quad dpi = \frac{25400}{d_{pix}} \quad (7)$$

Un altro modo per indicare la risoluzione dell'immagine in modo più corretto consiste nel usare il ***ground sampling distance GSD***, termine anglosassone per indicare la dimensione del pixel al suolo. Questo metodo considera l'area di superficie reale che copre un pixel sul sensore della fotocamera e risulta più indicato perché la risoluzione dipende sia dalla dimensione del pixel ma anche dalla focale della camera secondo la relazione:

$$GSD = l \cdot \frac{Z}{c} \quad (8)$$

Dove:

Z è la distanza di presa

l = dimensione del lato del pixel

c = focale della camera

quindi pixel di 10 μm con focale di 100 mm hanno una risoluzione maggiore di pixel più piccoli da 8 μm con focale di 60 mm.

Altri importanti aspetti da tenere in considerazione sono che la riduzione della dimensione del pixel può migliorare la risoluzione geometrica ma non la qualità radiometrica dell'immagine, inoltre la massa di dati da trattare cresce col quadrato della risoluzione e triplica ulteriormente se l'immagine è a colori.

3.1.3 Trattamento delle immagini digitali

Le immagini digitali hanno il vantaggio di poter essere facilmente elaborate ed opportunamente modificate per gli scopi fotogrammetrici. Posso raggruppare queste procedure in cinque gruppi:

- 1) **Acquisizione**, è la fase dove viene generata l'immagine; si dice diretta se si utilizza una fotocamera, o indiretta se si effettua l'acquisizione di un'immagine tradizionale con uno scanner.
- 2) **Compressione**, ha lo scopo di diminuire la mole di dati.

- 3) Pretrattamento, per migliorare l'aspetto dell'immagine o per recuperare dei dati degradati
- 4) Segmentazione, consiste nel uso di appropriati criteri per suddividere l'immagine in aree significative.
- 5) Visualizzazione, sono le tecniche per presentare le immagini.

Entrando nel merito delle tecniche di pretrattamento queste si suddividono in due sottocategorie, le **tecniche di ripristino**, utilizzate per eliminare lo sfocamento, i movimenti, i disturbi radiometrici e la distorsione delle lenti e le **tecniche di miglioramento**, per esaltare i bordi senza modificarne la posizione geometrica, ridurre il rumore, migliorare il contrasto, la variazione dei valori di grigio.

Le tre caratteristiche delle immagini digitali che più interessano il trattamento delle immagini per la fotogrammetria sono la luminosità, il contrasto e l'istogramma dei contenuti radiometrici.

Dato $g(x,y)$ modello di immagini in toni di grigio, si definisce la luminosità come la media $g_a(x,y)$ della funzione

$$g_a = \frac{1}{RC} \sum_{x=0}^{R-1} \sum_{y=0}^{C-1} (g(x,y)) \quad (9)$$

mentre la deviazione standard σ è la misura del suo contrasto, un'immagine con valori bassi di contrasto apparirà piatta.

$$\sigma = \frac{1}{RC} \sum_{x=0}^{R-1} \sum_{y=0}^{C-1} (g(x,y) - g_a)^2 \quad (10)$$

Questi due parametri permettono di definire la funzione di trasferimento del contrasto:

$$g'_{ij} = \alpha \cdot g_{ij} + r \quad (11)$$

Dove:

g'_{ij} è l'elemento della matrice immagine modificato

g_{ij} è l'elemento della matrice immagine non modificato

α è il parametro del controllo del contrasto

r è il parametro di controllo della brillantezza

Se si varia il parametro r si schiariscono (o scuriscono) in ugual modo tutti i colori. Potendoci essere valori maggiori di 255 applicando tale modifica si rischia di perdere informazioni.

Variando il contrasto si agisce sul coefficiente angolare della funzione di trasferimento portando i toni alti verso il bianco e i toni bassi verso il nero, Figura 15; venendo esaltate le differenze tra i valori cromatici si ottiene un aumento di profondità. Si osserva che la funzione di trasferimento del contrasto può non essere lineare ma soggetta ad un parametro γ

$$g_{ij} = g_{ij}^{\gamma} \quad (12)$$

che consente di aumentare il dettaglio in un'immagine a basso contrasto senza influenzare significativamente le ombre o le zone di luce.

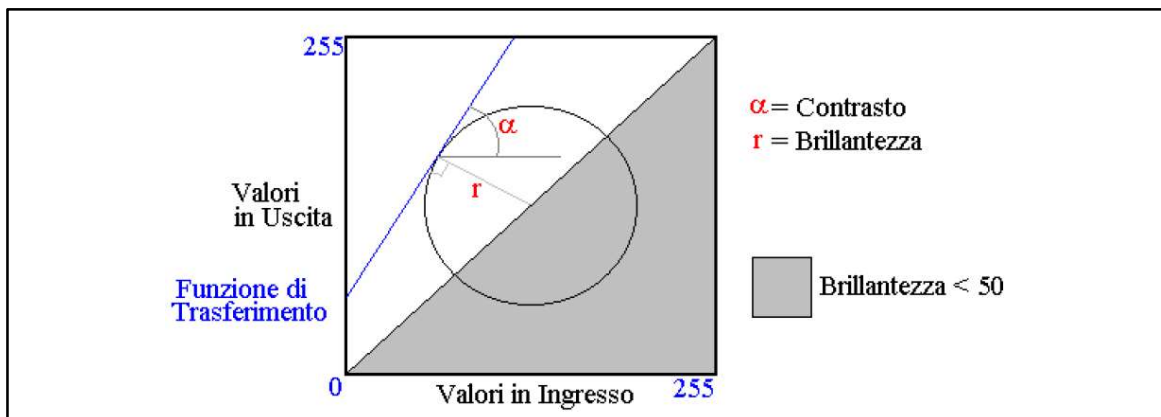


Figura 15: Funzione di trasferimento. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 18

Attraverso il calcolo dell'istogramma dei contenuti radiometrici è possibile avere un quadro immediato della distribuzione radiometrica in modo da avere una rappresentazione sintetica dei dati immagine. Assumendo il DN di ciascun *pixel* come una variabile casuale, il corrispondente istogramma rappresenta un

grafico discreto di frequenza che esprime la distribuzione dei livelli di grigio in tutta l'immagine. Nella Figura 16 si osserva sulle ascisse il valore che ogni pixel può assumere e in ordinata le frequenze cioè il numero di *pixel* che hanno quel valore.

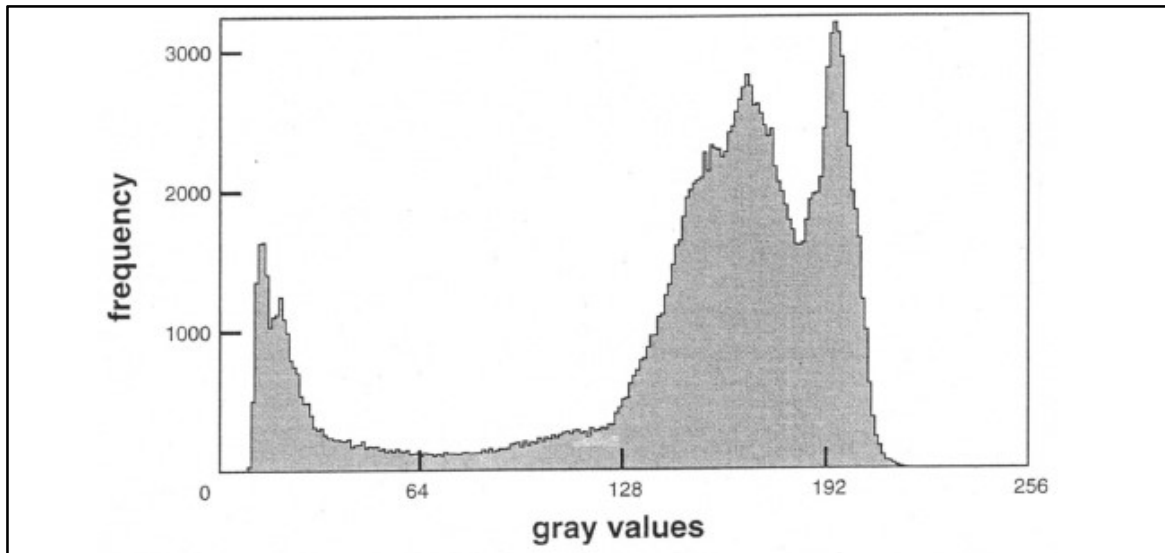


Figura 16: Istogramma dei valori di grigio di un'immagine. fonte: *Introduzione alla fotogrammetria digitale*, Prof. Antonio Zanutta, pag. 20

In questo caso si osserva che la figura non è di buona qualità cromatica, se così fosse l'istogramma assumerebbe una forma a campana di Gauss che coprirebbe tutta l'ampiezza disponibile dei valori radiometrici. Nel caso di una distribuzione normale si avrà quindi un valore di DN centrale che può essere ottenuto come media aritmetica dividendo la somma di tutti i valori dei *pixel* per il numero dei *pixel*. La conoscenza dell'istogramma dei valori di grigio e dei suoi valori di minimo e massimo è utile per ottenere espansioni o riduzioni di scala; ad esempio l'espansione della scala dei livelli radiometrici può essere usata per esaltare il contrasto dell'immagine rendendola più nitida e definita.

Un altro aspetto importante del trattamento delle immagini digitali riguarda il ricampionamento che è il problema di ridefinire il contenuto radiometrico di un'immagine che ha subito una trasformazione piana. Il problema nasce dal fatto che se si prova a trasformare un pixel dell'immagine iniziale nel sistema dell'immagine finale esso interesserà più pixel della seconda immagine, Figura 17.

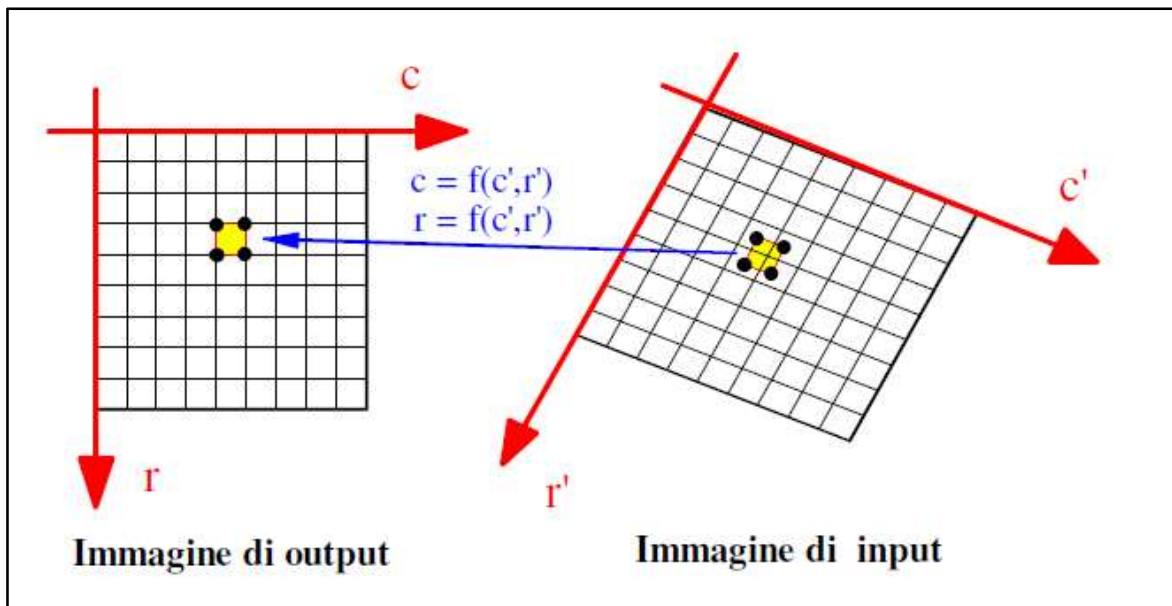


Figura 17: trasformazione piana di un'immagine e principio di ricampionamento. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 24

Esistono due approcci per risolvere questo problema:

- **Metodo dei baricentri**, consiste nel trasformare le coordinate del baricentro del primo pixel dell'immagine ricampionata nel sistema dell'immagine iniziale. Questo punto cadrà all'interno di un pixel di tale immagine da cui posso leggere il valore radiometrico e ricopio nel pixel di partenza.

Il problema è che si possono avere più baricentri che cadono nello stesso pixel dell'immagine iniziale ottenendo gruppi di pixel contigui che hanno lo stesso valore radiometrico; questo fenomeno è noto col nome di "effetto *blocking*".

Per ridurre questo effetto sono state elaborate delle strategie interpolative tra cui il metodo delle zone di influenza, il metodo delle distanze pesate, il metodo per interpolazione bilineare e il metodo per interpolazione bicubica.

- **Metodo del trasporto dei vertici**, consiste nel trasportare i vertici di ogni pixel output sull'immagine di input secondo una data trasformazione geometrica. I quattro vertici definiscono un'area A che contiene varie porzioni di pixel e di ognuna di tali porzioni si calcola la sua dimensione. Il valore radiometrico ricampionato sarà la media dei valori radiometrici dei pixel dell'area A pesati in funzione delle dimensioni dell'area che racchiudono.

Dalla scelta del metodo di ricampionamento dipende la qualità del risultato e il tempo di elaborazione. In ogni caso si ha un effetto di sfocamento rispetto all'immagine iniziale. Se non si ha l'esigenza di restituzione in tempi brevi si può usare l'interpolazione bicubica che annulla completamente l'effetto blocking, in alternativa anche l'interpolazione bilineare fornisce risultati soddisfacenti.

3.1.4 Acquisizione analogica e digitale

L'immagine tradizionale si ricava, da più di cent'anni, utilizzando una pellicola fotosensibile opportunamente inserita nella macchina fotografica. [S.7] La pellicola è un supporto sottile trasparente che può essere di origine naturale o sintetica a cui è sovrapposto uno strato di antialone per evitare riflessi interni. Sovrapposto a quest'ultimo si hanno degli strati costituiti da un'emulsione di microcristalli di alogenuro d'argento che in origine erano dispersi in una gelatina animale mentre oggi si usa una gelatina sintetica. Sono proprio i sali di alogenuro alchilici di bromo, cloro e iodio combinati col nitrato d'argento a dare la fotosensibilità; tale combinazione può essere opportunamente variata ottenendo come risultato dimensioni diversi dei cristalli, e quindi risoluzioni differenti. Mentre nella pellicole in bianco e nero è presente un solo strato di emulsione fotosensibile in quelle a colori se ne devono avere tre ognuno dei quali, grazie a delle molecole organiche dette sensibilizzatori spettrali, è sensibile ad una diversa frequenza di luce: rosso in basso, verde al centro e blu in alto. Tra lo strato blu e quello verde è posto un filtro colorante giallo per evitare il passaggio del blu agli strati sottostanti. È anche possibile tarare le emulsioni per frequenze diverse da quelle visibili come l'infrarosso, l'ultravioletto, i raggi X e raggi gamma.

Durante lo scatto la luce che entra dall'obiettivo attiva i cristalli di alogenuro imprimendo un'immagine che non è però visibile, per questo è detta immagine latente. Attraverso opportuni trattamenti chimici in soluzione acquosa si riesce a rivelare l'immagine e a renderla insensibile ad ulteriori esposizioni di luce; questi passaggi sono detti sviluppo e fissaggio.

L'immagine rivelata nel caso del bianco e nero è costituita da un finissimo particolato d'argento metallico in cui i toni di chiaro e scuro sono invertiti mentre nell'immagine rivelata in una pellicola a colori si hanno tre strati sovrapposti di coloranti complementari ai colori primari; per questa loro

particolarità cromatica la pellicola uscita dal trattamento chimico è detta negativo.

Le camere digitali sostituiscono alla pellicola un sensore fotosensibile che può essere lineare (o *linear array*) se è formato da un'unica riga di pixel oppure a matrice (o *area array*) di forma quadrata o rettangolare dove i pixel costituiscono un grigliato. Esistono due tipi di sensori a matrice, i primi sono i *Charghed-coupled device* CCD introdotti negli anni '70 e al momento più utilizzati, trasformano la luce incidente sui pixel in una carica elettrica e successivamente tali cariche vengono trasferite in modo sequenziale da un pixel all'altro creando una matrice di numeri memorizzabili ed elaborabili dal computer. La seconda tipologia di sensori sono i *Complementary Metal Oxide Semiconductor* C-MOS in cui ogni fotodiodo è accompagnato da un convertitore che trasforma l'energia luminosa in voltaggio, riduce il rumore e digitalizza il segnale e spesso lo amplifica; quindi in uscita dal sensore il segnale è già digitale.

Un sensore CCD è schematizzabile come una piastra di silicio di tipo positivo P con dei canali di tipo negativo N detti fotodiodi; nella Figura 18 è indicato un reticolato ideale passante nella mezzzeria delle strisce intercanale; ogni quadrato di questa maglia è un pixel.

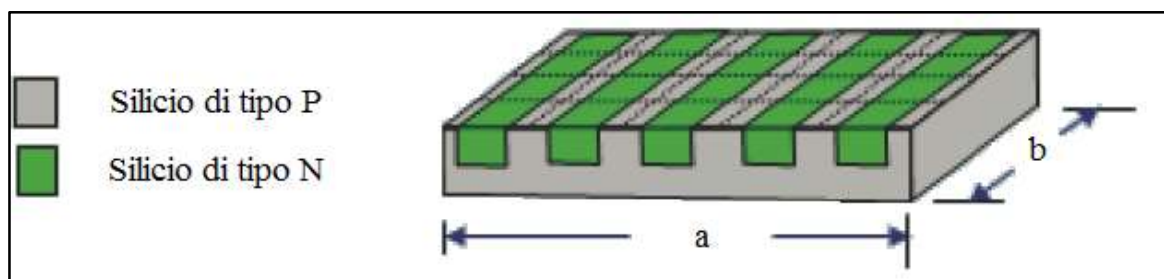


Figura 18: Schema di un sensore CCD. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 40

Alla base della matrice si trova un sensore lineare che ha tanti pixel quante sono le colonne della matrice; tra questo sensore e la matrice si trova una barriera di elettrodi di controllo, detta *transfer gate*, il cui scopo è di gestire il trasferimento delle cariche contenute nell'ultima riga del grigliato verso il sensore lineare. Successivamente le cariche elettriche passano dal sensore lineare ad un dispositivo che le converte da tensione, segnale analogico, in un numero ad esso proporzionale, segnale digitale.

Di seguito viene schematizzata la struttura di un pixel vista in sezione ortogonale ai canali di silicio N, Figura 19:

- Corpo del cristallo di silicio P
- Fotodiodo costituito dal silicio N
- Elettrodo trasparente caricato positivamente che crea nel silicio P un pozzo nel quale spinge e intrappola gli elettroni che vengono liberati dal silicio N
- Un elettrodo che comanda il tempo di integrazione, il tempo durante il quale si forma la carica elettrica in seguito all'esposizione alla luce.
- Filtro che permette il passaggio di un colore primario
- Può essere presente una microlente che converge tutta la luce incidente sul pixel nel fotodiodo.

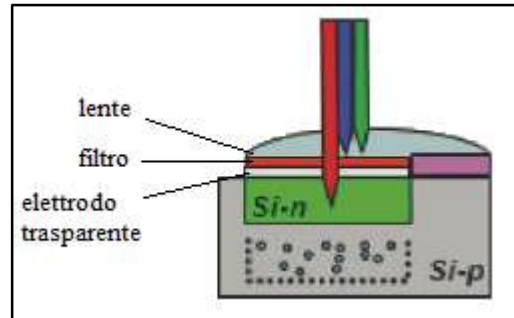


Figura 19: Struttura di un pixel in sezione ortogonale. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 43

I filtri sui fotodiodi permettono il passaggio di un solo colore primario per ottenere un'immagine a colori è quindi necessario che alcuni pixel del sensore siano sensibili al rosso, altri al verde e gli ultimi al blu. Esistono diverse disposizioni dei filtri tra questi ricordiamo lo schema Bayer che prevede che il 50% dei pixel siano sensibili alla luce verde, che è quella che l'occhio umano percepisce in maniera predominante per la nitidezza e la definizione dell'immagine, mentre la restante metà è dedicata in egual misura alla luce rossa e blu. In fase di post processing su ogni pixel verranno derivati i colori mancanti mediando l'intensità dei pixel adiacenti, Figura 20.



Figura 20: Disposizione dei filtri con schema Bayer. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 43

È anche possibile usare un maggior numero di pixel per interpolare i colori mancanti, questo però va a scapito della risoluzione dell'immagine. Entrando più nel dettaglio si osserva che vi è differenza tra la dimensione del pixel e del fotodiode che deve necessariamente essere contornato dagli elettrodi che gestiscono il controllo del tempo di integrazione e il trasferimento delle cariche. Nel caso di pixel quadrati si corre il rischio che elementi lineari non vengano mai catturati perché passanti sulla zona “cieca” del sensore, per questo motivo sono state adottate altre forme, ad esempio quella ottagonale e disposti in modo quinconce. Infine abbiamo il sensore Foveon che prendendo spunto dal funzionamento della retina dell'occhio umano utilizzando dei fotodiodi con tre strati non omogenei disposti verticalmente in uno spessore di 2 μm e sensibili alle tre bande delle onde elettromagnetiche dei tre colori primari. In Figura 21 vengono riportati i tre sensori citati.

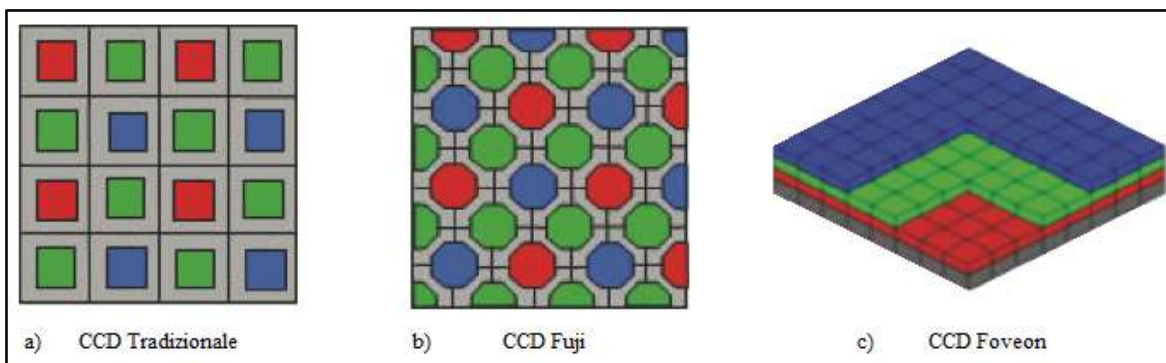


Figura 21: Diverse tipologie di Pixel. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 45

Per quanto riguarda i sensori lineari, come è facilmente intuibile, si ha un sensore costituito da un'unica riga di pixel che aver acquisito la carica la fa pervenire al convertitore digitale. Si procede quindi facendo traslare il sensore sul piano focale costruendo l'immagine come accostamento di numerose striscioline, Figura 22, è quindi necessario che il soggetto rimanga fermo per tutto il tempo dell'acquisizione ed inoltre si dovrà procedere ad una scansione per ogni colore primario antepo- nendo al sensore il filtro corrispondente.

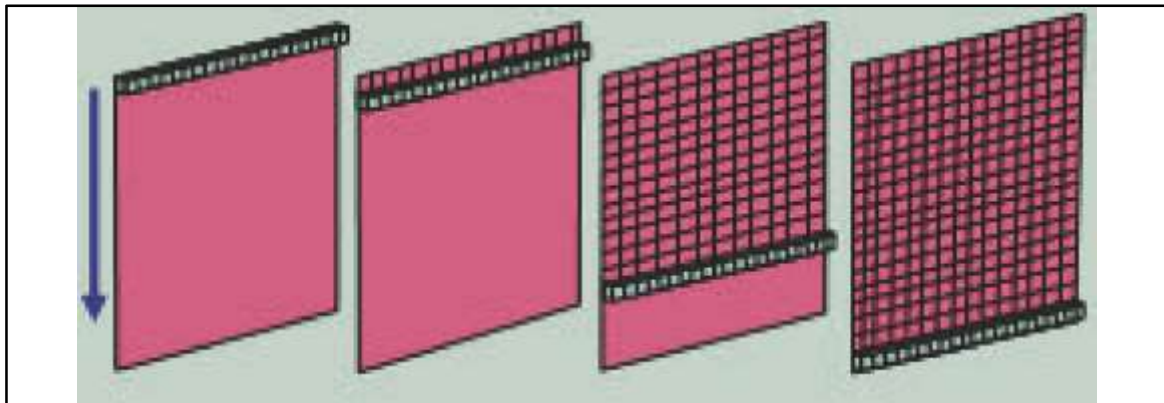


Figura 22: Acquisizione mediante sensore lineare. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 47

Per evitare la tripla scansione è possibile utilizzare un sensore trilineare costituito dall'unione di tre sensori lineari, Figura 23.

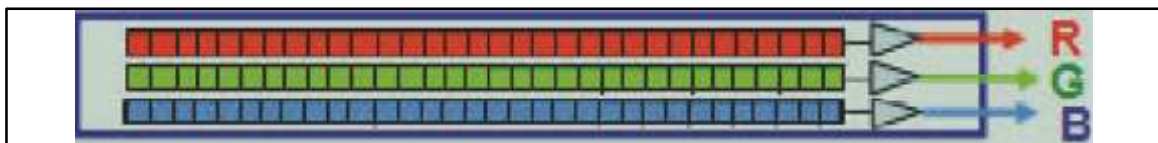


Figura 23: Sensore trilineare. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale Prof. Antonio Zanutta, pag. 47

Si osserva che i sensori lineari consentono una risoluzione maggiore dei sensori a matrice; infatti in quest'ultimi per estendere il numero di pixel si dovrà aumentare sia le righe che le colonne incorrendo in notevoli difficoltà costruttive per dimensioni maggiori ai 5000x7000 pixel, mentre i sensori lineari possono arrivare agevolmente a 14.400 pixel.

Nel caso di acquisizioni satellitari o aeree si presenta il problema della non stazionarietà della presa. Si utilizzano i *pushbroom line scanner* che effettuano la ripresa avendo però la necessità di svuotare le cariche accumulate durante il tempo di integrazione in tempi molto brevi in funzione della dimensione del pixel a terra e della velocità dell'aereo.

Come è già stato esposto nel 3.1.2 la dimensione del pixel a terra è data da

$$GSD = l \cdot \frac{Z}{c} \quad (8)$$

Dove Z è la distanza di presa, c la focale e l la dimensione del pixel.

Se la velocità media V è data dal rapporto tra lo spazio δS percorso e l'intervallo di tempo ΔT impiegato

$$V = \frac{\delta S}{\Delta T} \quad (13)$$

Si avrà che per percorrere lo spazio δS pari al GSD occorrerà il tempo

$$\Delta T = \frac{GSD}{V} \quad (14)$$

Quindi il tempo di svuotamento del sensore per garantire la continuità dell'immagine dovrà essere minore di

$$\Delta T < \frac{l \cdot \frac{Z}{c}}{V} \quad (15)$$

Per ridurre il tempo di svuotamento del sensore si è introdotto l'utilizzo di due registri di scorrimento uno per le cariche pari e uno per le cariche dispari, Figura 24, riuscendo quindi a dimezzare i tempi.

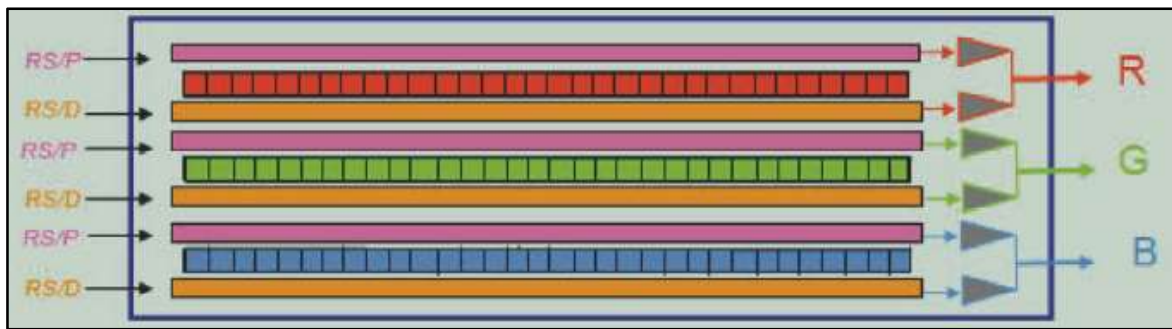


Figura 24: Sensore lineare a due registri di scorrimento, una per cariche pari e una per dispari. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 51

Il passaggio successivo è stato quello di utilizzare due convertitori analogico/digitale in modo che ogni registro si svuoti per metà verso destra e per metà verso sinistra, riducendo il tempo necessario ad un quarto di quello del sensore standard, Figura 25.

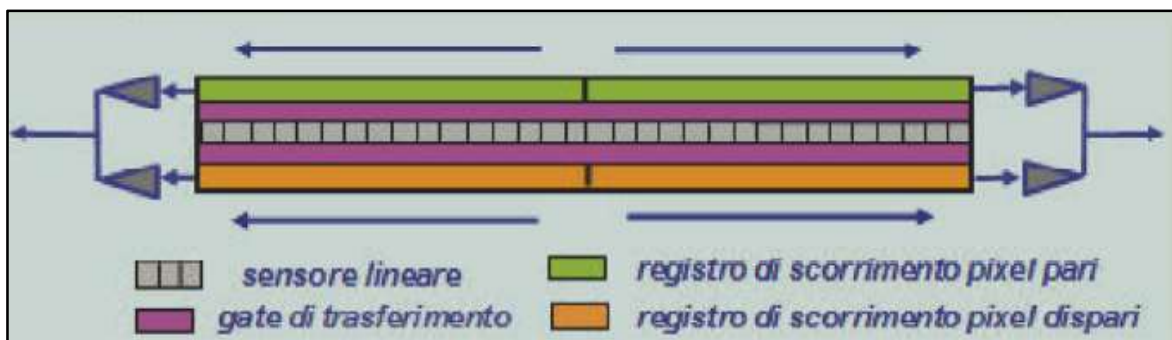


Figura 25: Sensore lineare con due registri di scorrimento e due convertitori A/D. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 51

3.1.5 Image Matching

Con *Image Matching* si intendono quelle procedure automatiche atte ad identificare i punti omologhi nei fotogrammi digitali.

Il procedimento può essere suddiviso in quattro fasi:

- 1) Selezione di una porzione di immagine
- 2) Ricerca di entità coniugate nell'altra immagine
- 3) Calcolo della posizione 3D dell'entità nello spazio oggetto
- 4) Applicazione dei filtri per eliminare gli *outliers*

La ricerca di entità coniugate è la fase più difficile da risolvere, se infatti si volesse confrontare ogni singolo pixel di due immagini sovrapposte per il 60% sarebbero necessario un numero di operazioni molto elevato; inoltre l'entità ricercata non sarebbe univoca, è infatti possibile che esistano due pixel non omologhi con lo stesso contenuto radiometrico. Per ridurre il numero di operazioni è necessario restringere la ricerca di entità coniugate in zone minori utilizzando dei criteri logici mentre per risolvere le ambiguità si adottano entità campione più caratteristiche.

Nel caso teorico di presa in assetto normale di una zona pianeggiante si otterrebbero due immagini coincidenti alla perfezione, senza distorsioni e centrate sul punto coniugato come mostrato nella Figura 26.

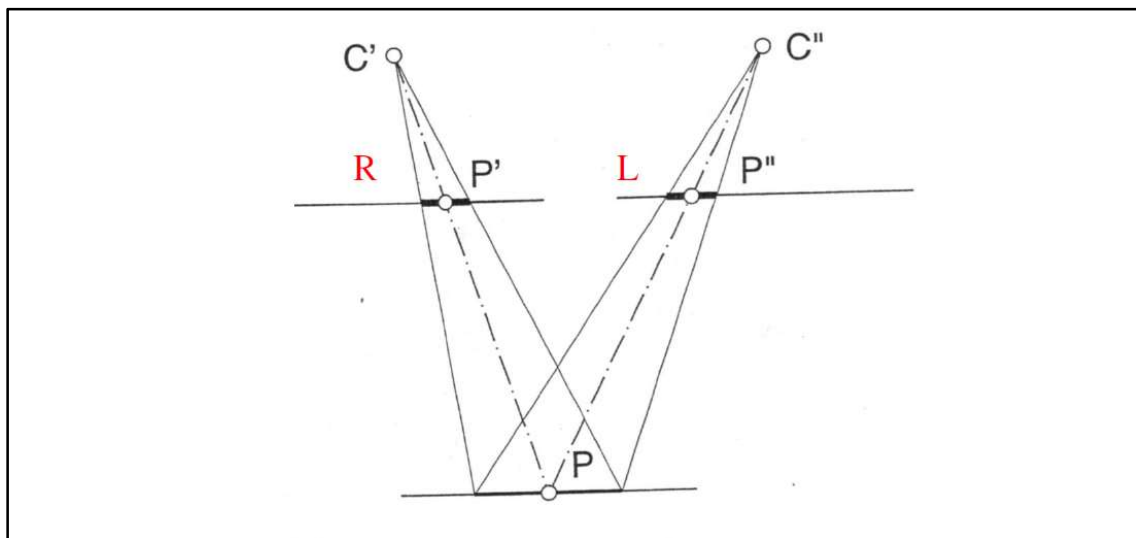


Figura 26: Caso ideale di presa in assetto normale con terreno pianeggiante. fonte: *Introduzione alla fotogrammetria digitale*, Prof. Antonio Zanutta, pag. 64

In realtà il terreno non è perfettamente pianeggiante e questo comporta che anche in caso di sovrapposizione di immagini campione nel punto omologo si avranno pixel relativi a porzioni di terreno differenti a causa della distorsione geometrica dovuta alla tridimensionalità del terreno stesso, Figura 29. A ciò si possono aggiungere delle variazioni di scala dell'immagine a causa della variazione della quota di presa, Figura 27, e gli effetti delle singole rotazioni, rollio, beccheggio e deriva, che anche in caso di perfetta sovrapposizione del punto omologo avranno pixel relativi a porzioni di terreno differenti, Figura 28.

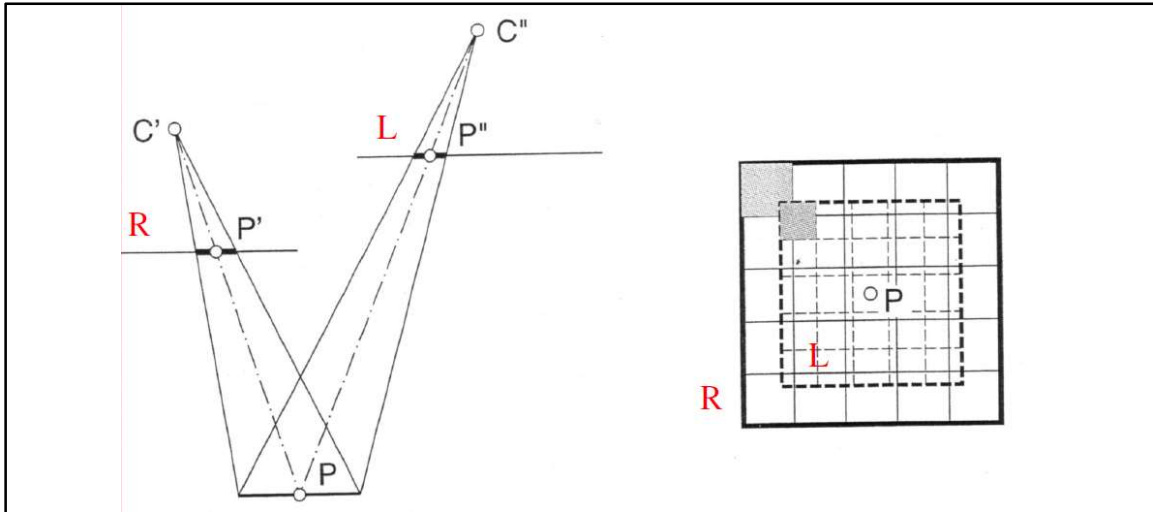


Figura 27: Variazione di scala per presa a quota diversa. fonte: *Introduzione alla fotogrammetria digitale*, Prof. Antonio Zanutta, pag. 65

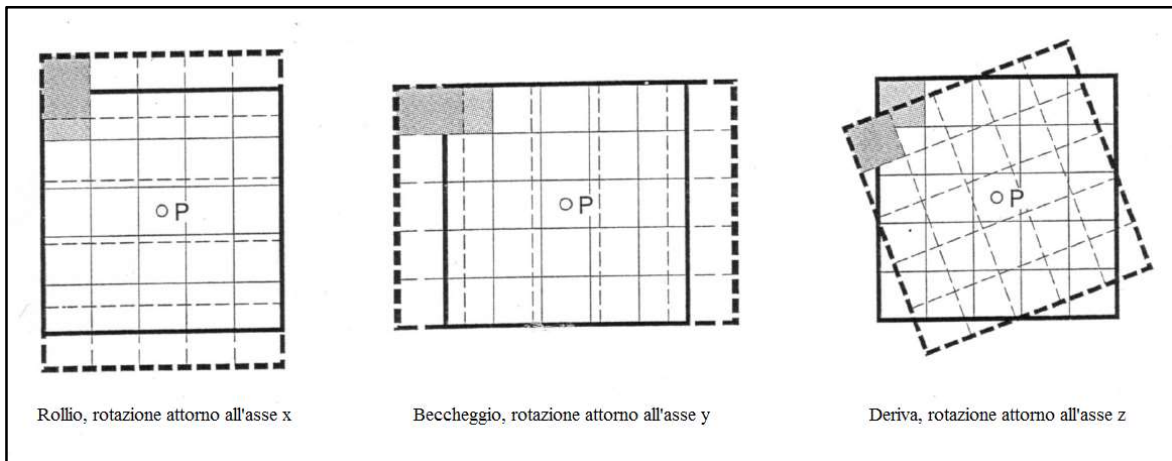


Figura 28: Effetti delle singole rotazioni. fonte: *Introduzione alla fotogrammetria digitale*, Prof. Antonio Zanutta, pag. 65

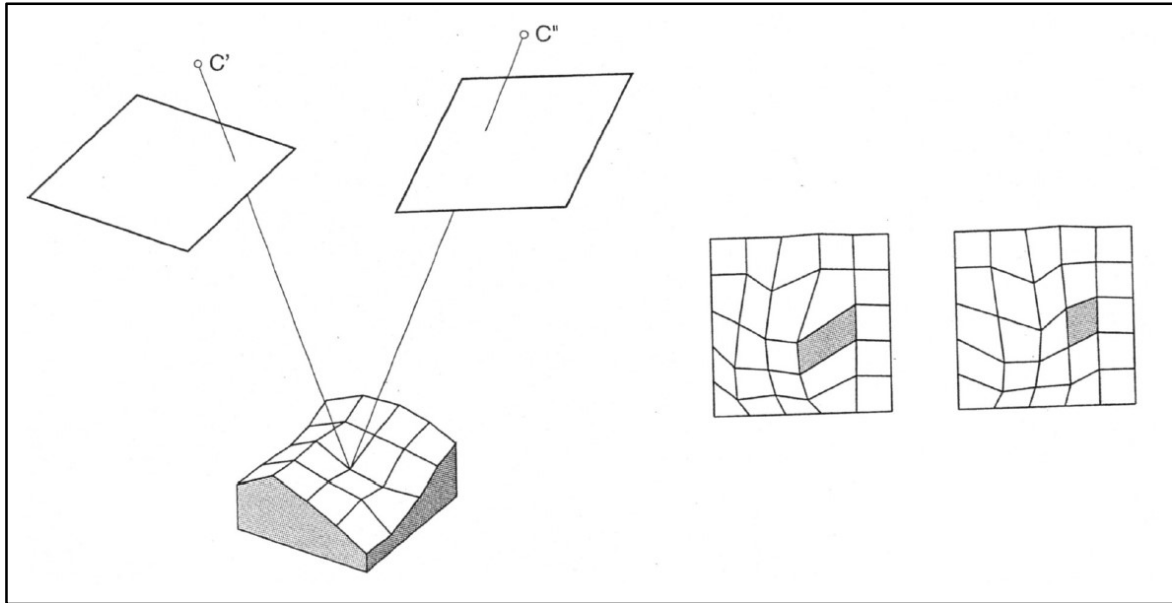


Figura 29: Distorsione geometrica dovuta alla tridimensionalità del terreno. fonte: *Introduzione alla fotogrammetria digitale*, Prof. Antonio Zanutta, pag. 66

Per tutti questi motivi è fondamentale utilizzare dei metodi per ridurre lo spazio di ricerca; di seguito vengono esposti il **metodo delle linee epipolari**, la **correlazione vertical line locus**, e l'**approccio gerarchico**.

Metodo 1: linee epipolari

Nella geometria epipolare ci si trova nel caso della stereoscopia, quindi la stessa scena viene catturata da due fotocamere con posizione e orientamento distinto, Figura 30. Assunto un punto oggetto P e i due centri di proiezione c dei due fotogrammi, si definisce piano epipolare il piano passante per questi tre punti. L'intersezione dei piani dei fotogrammi con il piano epipolare costituisce le due linee epipolari.

I punti omologhi \bar{P}_1 e \bar{P}_2 devono trovarsi necessariamente sulle linee epipolari e questo riduce notevolmente la ricerca che deve compiere l'algoritmo. Nel caso generale le linee epipolari non sono orientate parallelamente agli assi del sistema immagine ma è possibile ricampionare le immagini originali in modo da renderle parallele e ottenere così delle immagini normalizzate ottenendo quindi assi della camera paralleli tra loro e ortogonali alla linea di base con parallasse trasversale nulla $P_\eta = 0$.

Il procedimento si distingue quindi in due fasi:

- Creare un'immagine in assetto normale
- Ricerca di correlazione lungo la linea epipolare

Nella prima fase, noti i parametri di orientamento interni ed esterni, oppure eseguito l'orientamento relativo, è possibile ottenere delle immagini normalizzate, cioè con parallasse orizzontale nulla.

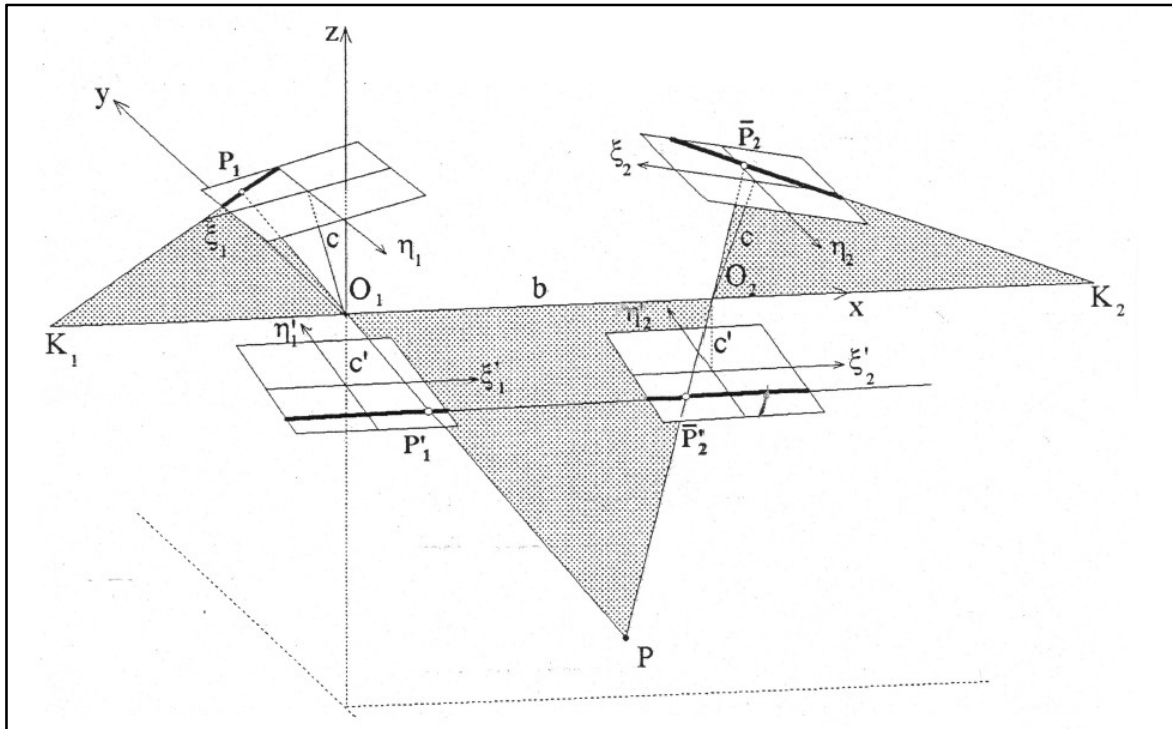


Figura 30: Geometria Epipolare. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag.67

Le relazioni analitiche per passare dalle coordinate dell'immagine originale (ξ , η) alle coordinate dell'immagine normalizzata (ξ' , η') utilizzando le equazioni di collinearità sono:

$$\begin{vmatrix} \xi - \xi_0 \\ \eta - \eta_0 \\ -c \end{vmatrix} = R^T \begin{vmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{vmatrix} \text{ con } R = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} i_1 & j_1 & k_1 \\ i_2 & j_2 & k_2 \\ i_3 & j_3 & k_3 \end{vmatrix} \quad (16)$$

Con:

ξ , η = coordinate immagine

c , ξ_0 , η_0 = parametri di orientamento interno

x, y, z = coordinate oggetto locali

x_0, y_0, z_0 = coordinate del centro di proiettività del primo fotogramma

r_{ij} = elementi della matrice di rotazione R , funzioni trigonometriche delle tre rotazioni ω, φ, κ attorno agli assi principali

i, j, k versori delle tre rotazioni ω, φ, κ attorno agli assi x, y, z .

che equivalgono alle seguenti

$$\xi - \xi_0 = r_{11}(x - x_0) + r_{21}(y - y_0) + r_{31}(z - z_0) \quad (17)$$

$$\eta - \eta_0 = r_{12}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{32}(z - z_0) \quad (18)$$

$$-c = r_{13}(x - x_0) + r_{23}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0) \quad (19)$$

Dividendo sia la (16) che la (17) con la (18) si ottengono le equazioni di collinearità. La forma inversa si ottiene moltiplicando la (15) a destra e a sinistra per la matrice di rotazione R

$$x - x_0 = r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c \quad (20)$$

$$y - y_0 = r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c \quad (21)$$

$$z - z_0 = r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c \quad (22)$$

Le relazioni analitiche fra le coordinate immagine ξ, η , e le coordinate ξ', η' dell'immagine normalizzata, Figura 31, si ottengono dalle equazioni di collinearità facendo le seguenti assunzioni:

- $\xi_0, \eta_0 = 0$ coordinate immagine del Punto di Miglior Simmetria BPS
- si sostituisce $(z - z_0)$ alla distanza principale $-c'$
- si sostituisce $(x - x_0) = \xi', (y - y_0) = \eta'$

dalla (15) per sostituzione si ottiene

$$\begin{vmatrix} \xi \\ \eta \\ -c \end{vmatrix} = R^T \begin{vmatrix} \xi' \\ \eta' \\ -c' \end{vmatrix} \quad (23)$$

E infine

$$\xi = -c \frac{r_{11}\xi' + r_{21}\eta' - r_{31}c'}{r_{13}\xi' + r_{23}\eta' - r_{33}c'}; \eta = -c \frac{r_{12}\xi' + r_{22}\eta' - r_{32}c'}{r_{13}\xi' + r_{23}\eta' - r_{33}c'} \quad (24)$$

I punti immagine omologhi si trovano su di una linea avente la stessa coordinata η è quindi possibile correlare in modalità monodimensionale l'intero modello stereoscopico.

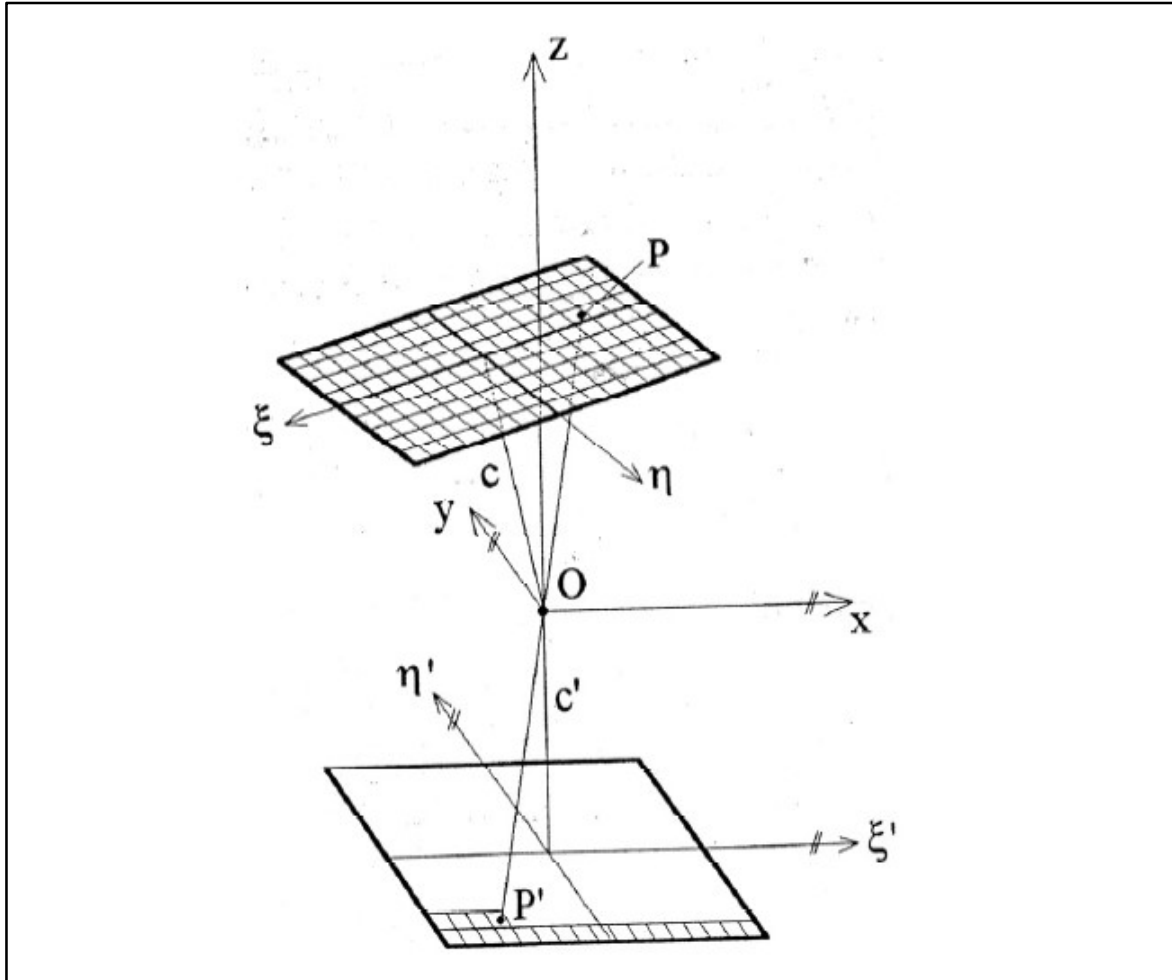


Figura 31: Fotogramma originale e normalizzato. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 71

Per quanto riguarda la seconda fase, la ricerca di correlazioni lungo la linea epipolare, con riferimento alla Figura 32 si vuole determinare la posizione di un punto a terra S con una procedura di *Image Matching* eseguita lungo la linea epipolare corrispondente.

Se sul primo fotogramma si individua un punto immagine P' corrispondente ad un punto oggetto P , la ricerca del corrispettivo punto omologo P'' sul secondo fotogramma si concentrerà solo sulla linea epipolare di tale fotogramma e non su tutta la zona di sovrapposizione. Inoltre se si conosce la scabrosità e la quota media della zona la ricerca può essere ulteriormente

ridotta; uno spostamento di quota di P lungo la retta proiettiva che lo unisce al centro di proiezione c' comporta una variazione di posizione del punto immagine corrispondente P'' sul secondo fotogramma lungo la linea epipolare.

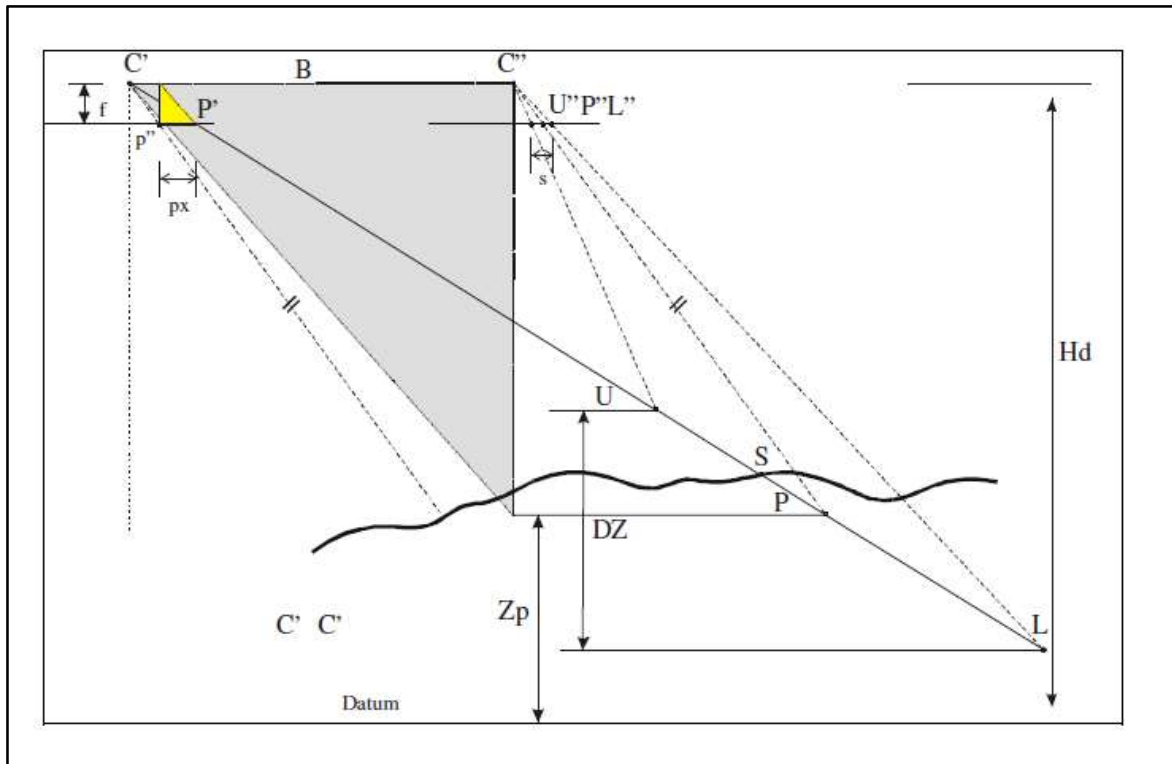


Figura 32: Ricerca della posizione omologa di un punto lungo la linea epipolare corrispondente. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 75

La posizione di x''_p del punto P può essere determinata dalla

$$x''_p = x_p - b_0 \frac{H_D}{H_D - Z_D} \quad (25)$$

Con

x'_p coordinate immagine del punto oggetto P sul primo fotogramma (P')

b_0 immagine della fotobase

H_D quota del centro di proiezione del fotogramma

Z_D quota del punto oggetto ideale P che rispecchia la quota media della zona

Essendo S il punto reale a terra, il punto P è un punto stimato sulla base della quota di zona e ΔZ sarà l'incertezza della stima della quota valutata in base al valore massimo e minimo delle quote di zona indicati in figura con la lettera U ed L.

L'incertezza ΔZ definisce sulla linea epipolare un segmento s funzione della fotobase, della quota di volo, dell'incertezza della stima di ΔZ e della quota degli estremi U ed L.

$$s = \frac{b_0 H_D \Delta Z}{(H_D - Z_U)(H_D - Z_L)} \quad (26)$$

Quindi individuato un punto immagine nel primo fotogramma si è in grado di focalizzare la ricerca dell'omologo lungo il tratto s. La procedura può essere schematizzata in:

- Selezione di una porzione della prima immagine che contenga il punto immagine P'
- valutazione della quota Z_p del punto P e la sua incertezza ΔZ
- calcolo della posizione del punto P stimato sulla seconda immagine, punto P''
- calcolo dell'intervallo di ricerca s
- realizzazione del *matching* all'interno dell'intervallo di ricerca s
- valutazione delle misure di similarità per la determinazione della posizione coniugata P''

Metodo 2: Correlazione Vertical Line Locus

Il metodo consiste nel restringere la ricerca delle corrispondenze alle linee epipolari generate dall'intersezione tra le due immagini e i piani principali che contengono la linea verticale \overline{UL} passante per il punto oggetto, Figura 33.

Partendo da una stereocoppia con C' e C'' i centri di proiezione dai quali si individua a terra un punto reale S e facendo passare da questo la verticale \overline{UL} lunga ΔZ avente come centro il punto P a quota stimata, si considerino i triangoli C'UL e C''UL costituiti dalle rette proiettive colleganti i centri di proiezione con gli estremi della verticale \overline{UL} . Questi due triangoli si

intersecano con i piani immagine formando le due linee epipolari convergenti verso i rispettivi punti nadirali. Anche in questo caso la ricerca dei punti omologhi si concentra sulle linee epipolari.

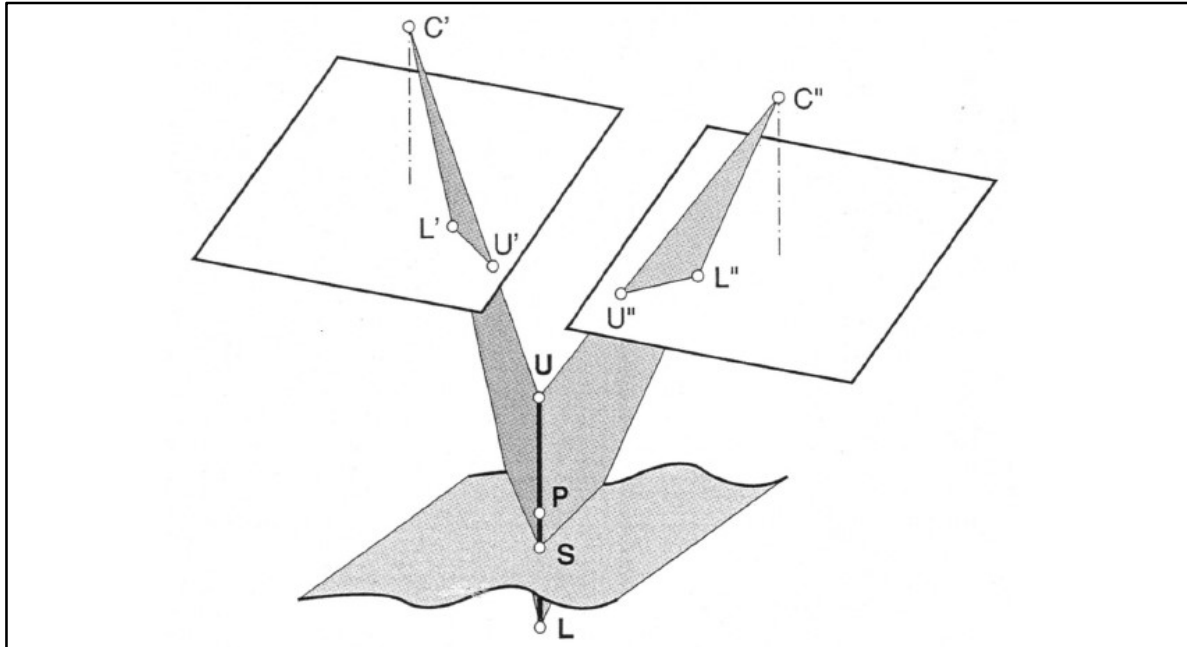


Figura 33: Correlazione Vertical Line Locus. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag.77

Metodo 3: Approccio gerarchico

In questo caso si effettua la ricerca di corrispondenze per livelli partendo da un'immagine a risoluzione grossolana fino ad arrivare ad un'immagine a risoluzione più fine. Vengono quindi generate delle immagini piramidali estraendo dall'immagine originale, altre immagini a risoluzione differente, Figura 34. Partendo dalla risoluzione grossolana i punti omologhi individuati diventano i punti centrali nel livello successivo fino ad arrivare all'immagine con la risoluzione più fine. Si riesce quindi a

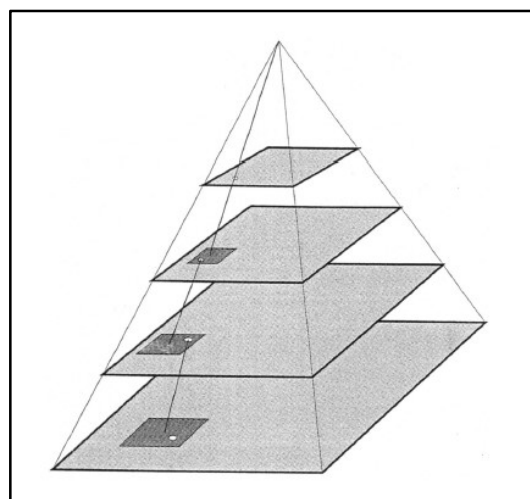


Figura 34: Schema di immagini piramidali. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 79

ridurre lo spazio di ricerca e a determinare con accuratezza i valori approssimati delle posizioni coniugate dei punti.

Per automatizzare la ricerca di coppie di punti omologhi si individua una matrice sagoma sulla prima immagine che viene ricercata sulla seconda utilizzando le tecniche di autocorrelazione; maggiore sarà la dimensione dell'immagine sagoma e minore sarà l'ambiguità ma il prezzo da pagare è l'aumentano delle distorsioni geometriche. Questo è possibile grazie agli operatori di interesse" che sono in grado di individuare i punti, linee o aree che presentano variazioni di densità, detti bordi radiometrici. Analiticamente si tratta di matrici alle derivate prime e seconde dell'immagine originale. Per ottimizzare il processo è possibile esaltare le discontinuità usando dei filtri che esaltino i contrasti senza falsare il contenuto geometrico.

Ricerca di similitudini con metodi di correlazione *Area Based*

In questo caso vengono correlati i livelli di grigio in base alla loro distribuzione in una porzione di immagine, chiamata sagoma o *image patch*, con la sua controparte nell'altra immagine; la porzione di immagine entro la quale andiamo a muovere l'immagine sagoma è detta matrice di ricerca o *search window*. Infine la porzione di immagine ottenuta comparando l'immagine sagoma nella finestra di ricerca è detta finestra di correlazione, in inglese *matching window*.

La matrice sagoma dipende dal problema che si vuole risolvere; ad esempio nel caso della ricerca automatica di marche fiduciali o croci di reticolo la matrice sagoma sarà proprio la marca fiduciale, nel caso di punti d'appoggio segnalizzati la matrice sagoma sarà l'immagine digitale del segnale mentre per punti naturali vanno create matrici sagoma di forma e condizioni differenti in base alle caratteristiche dei punti impiegati, infine per la ricerca di punti di legame si avrà che la matrice sagoma sarà una porzione delle immagini e l'area di ricerca una zona dell'altra immagine.

I metodi di correlazione area based si fondano principalmente su due criteri:

- la ricerca del massimo coefficiente cross-correlazione
- il metodo dei minimi quadrati per minimizzare la differenza del livello di grigio

Il primo metodo consiste nel cercare la massima correlazione dei livelli di grigio spostando l'immagine mobile su quella fissa; viene quindi valutato

l'indice di correlazione ρ , nel punto dove la funzione di cross correlazione è massima si ha la posizione di migliore somiglianza tra matrice ricerca e matrice sagoma.

Il fattore di correlazione ρ che va calcolato per ogni posizione dell'immagine sagoma all'interno della finestra di ricerca è:

$$\rho = \frac{\sigma_{LR}}{\sigma_L \sigma_R} \text{ dove } -1 \leq \rho \leq 1$$

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_L(x_i, y_i) - \bar{g}_L)^2}{nm - 1}}; \bar{g}_L = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_L(x_i, y_i)}{nm}$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_R(x_i, y_i) - \bar{g}_R)^2}{nm - 1}}; \bar{g}_R = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_R(x_i, y_i)}{nm}$$

$$\sigma_{LR} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((g_L(x_i, y_i) - \bar{g}_L)(g_R(x_i, y_i) - \bar{g}_R))}{nm - 1}$$
(27)

σ_L deviazione standard dell'immagine L (sagoma)

σ_R deviazione standard dell'immagine R (finestra di matching)

σ_{LR} covarianza delle porzioni di immagine L e R

\bar{g}_L valore medio della matrice L

\bar{g}_R valore medio della matrice R

n numero di righe

m numero di colonne

Nasce ora il problema di determinare la posizione u, v nella quale tale valore sia massimo. Il coefficiente di cross correlazione assume valori compresi tra 1 se le immagini sagoma e la finestra di correlazione sono uguali, e -1 se la relazione è perfettamente inversa. Quando ρ si annulla non c'è similarità.

Tuttavia è possibile che un valore massimo di ρ non corrisponda effettivamente all'individuazione di un punto omologo (e non sempre un valore basso corrisponda a punti non omologhi) infatti in caso di aree in ombra e quindi con radianza simile, due punti possono essere restituiti erroneamente come omologhi.

È possibile determinare la qualità di un punto omologo attraverso il fattore di schiacciamento (*flatness*) α che viene ottenuto calcolando le tangenti alla curva ottenuta per interpolazione di ρ in prossimità del punto di massimo.

Un alto valore di α restituisce una curva piatta che evidenzia una debole corrispondenza dei punti omologhi caratterizzata da un basso contrasto, al contrario un basso valore di α osservabile con massimo ben definito porta a credere che i punti siano effettivamente omologhi. Nel caso vi siano due picchi siamo in presenza di *pattern* ripetuti nelle immagini sagoma e di *matching*, in questo caso la scelta del punto omologo è ambigua. In Figura 35 sono riportati i tre casi.

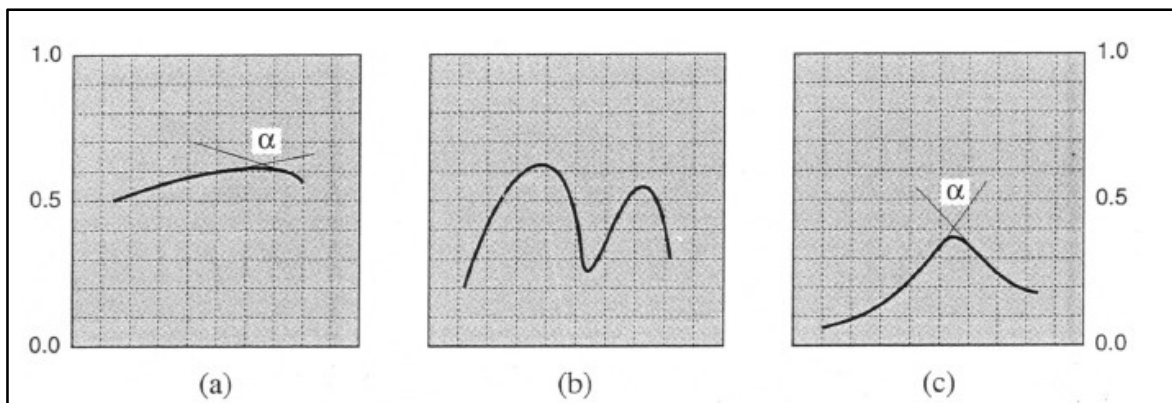


Figura 35: andamento della funzione di cross correlazione e parametro α . fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta, pag. 87

L'algoritmo di correlazione può essere reso più stabile ricorrendo alla pesatura della matrice sagoma, ad esempio è possibile assegnare ai pixel dell'area centrale della matrice sagoma un peso maggiore che decresce allontanandosi da questo.

Il secondo metodo è la correlazione ai minimi quadrati nota anche come Least Square Matching (LSM) prevede di determinare il grado di correlazione tra matrice sagoma e matrice ricerca come somma dei quadrati delle differenze dei valori di grigio.

Anche in questo caso viene estratta una matrice sagoma $g_1(\xi, \eta)$ mentre dalla posizione approssimata nella seconda immagine viene estratta una porzione di immagine detta matrice di ricerca $g_2(\xi, \eta)$. Nel caso senza deformazione si avrebbe uguaglianza delle matrici

$$g_1(\xi, \eta) = g_2(\xi, \eta) \quad (28)$$

Nel caso reale invece esse differiranno per posizione e densità. Il grado di somiglianza è misurato dalla somma dei quadrati delle differenze dei valori radiometrici dei pixel corrispondenti nelle due immagini. La posizione ideale si avrà imponendo:

$$\sum_i \sum_j (g_1(\xi, \eta) - g_2(\xi, \eta))^2 = \min \quad (29)$$

A differenza del metodo precedente ora vengono inserite nella funzione da minimizzare una serie di parametri che permettono di variare forma e contenuto della finestra mobile e di realizzare la correlazione subpixel generando un procedimento iterativo che governa la convergenza al minimo. Le differenze locali fra le due immagini sono legate alla geometria e alla radiometria e dipendono da molteplici fattori:

- Le differenze geometriche dipendono dalla posizione del punto di presa, assetto del sensore, focale e distanza di presa, forma e variazione nel tempo dell'oggetto
- Le differenze radiometriche dipendono da variazioni di illuminazione, riflettività dell'oggetto, funzione di trasferimento del sensore, esposizione, sviluppo e variazioni temporali dell'oggetto

Si procede quindi applicando una trasformazione geometrica bidimensionale e una trasformazione radiometrica alla matrice di ricerca $g_2(\xi, \eta)$ per renderla più simile alla matrice sagoma.

Quindi la (27) diventa

$$g_1(\xi, \eta) = f_r[g_2(u, v)] \quad (30)$$

Con

$u = u(\xi, \eta)$ trasformazione geometrica lungo u

$v = v(\xi, \eta)$ trasformazione geometrica lungo v

f_r = trasformazione radiometrica

L'approccio rigoroso prevede l'utilizzo delle equazioni della proiezione centrale ma, essendo l'immagine indagata piccola, è possibile usare la

trasformazione omografica o nei casi più semplificati una trasformazione affine o conforme.

Per quanto riguarda le differenze radiometriche si usa una trasformazione lineare a due parametri.

$$g_1(\xi, \eta) = g \cdot g_2(u, v) + s \quad (31)$$

Con

g = guadagno radiometrico (*gain*); è un fattore moltiplicativo dei valori di grigio che ha l'effetto di un fattore di scala che realizza uno stiramento del contrasto

s = traslazione (*shift*) dei valori radiometrici; è uno spostamento della scala dei valori di grigio

Per ogni finestra di matching vengono calcolati i parametri di trasformazione ai minimi quadrati, successivamente vengono applicati e valutati i residui; i residui più bassi individuano le corrispondenze. Dalla compensazione si può ricavare la precisione di posizione che può avere un ordine di grandezza migliore delle dimensioni del pixel.

Feature Based Matching (FBM)

Dalle immagini vengono estratte delle caratteristiche, dette *feature*, che sono elementi chiaramente distinguibili dagli elementi geometrici o radiometrici adiacenti. Le *feature* possono essere locali o globali; quelle locali sono entità semplici come punti, bordi di oggetti, linee o aree con tessiture particolari, mentre le globali sono costituite da poligoni, che possono essere aperti o chiusi, o da un insieme di semplici *feature*.

Al termine della procedura di estrazione, viene creata per ogni immagine una lista che raccoglie tali caratteristiche e le loro descrizioni in modo che solo queste liste vengano messe a confronto per cercare delle corrispondenze ottenendo infine una lista di elementi omologhi a partire da coppie di immagini cui applicare il *Least Square Matching* (LSM).

Per estrarre i *feature* puntuali si utilizzano gli operatori di interesse.

Relation Matching (RM)

È spesso usato per l'interpretazione delle immagini nella *Computer Vision* e consiste in un paragone di relazioni che vengono estratte da ogni immagine e poste a confronto. In questo caso sono usate le feature globali che possono essere geometriche, nel caso di poligoni aperti o chiusi, radiometriche, nel caso di differenze tra i valori di grigio di aree adiacenti, topologiche nel caso di notazioni di caratteristiche contenute in un'altra.

In seguito l'operatore di interesse estrae le feature che verranno poi confrontate con il database modello per determinare le feature globali le quali verranno salvate in modo simbolico attraverso dei grafi e registrate per essere messe a confronto e trovare le corrispondenze.

Un limite del matching relazionale è dato dalla grande varietà di forme che possono avere gli oggetti; se il numero di corrispondenze è elevato sarà necessario ridurre lo spazio di ricerca il più possibile e introdurre informazioni aggiuntive nel modello per semplificare il problema.

3.1.6 I detectors per rilevare i punti di interesse

I detectors sono operatori in grado di individuare i punti di interesse analizzando la luminosità, agiscono quindi sulle derivate del contenuto radiometrico nella matrice immagine, e estraendo i contorni determinano la variazione di direzione di segmenti costituiti da medesima intensità di colore.

I più comuni operatori per individuare i punti di interesse sono:

- Operatori tipo Harris
- Operatori tipo Hessian

L'operatore di Harris prevede l'utilizzo di un campionario di dimensione fissa che ricerca cambiamenti geometrici nell'immagine, Figura 36; l'operatore utilizza il coefficiente di cross correlazione per individuare una variazione significativa dei bordi e una volta individuato un punto di interesse ne registra le coordinate. Gli operatori di Harris non sono invarianti rispetto alla scala ma solo alla rotazione.

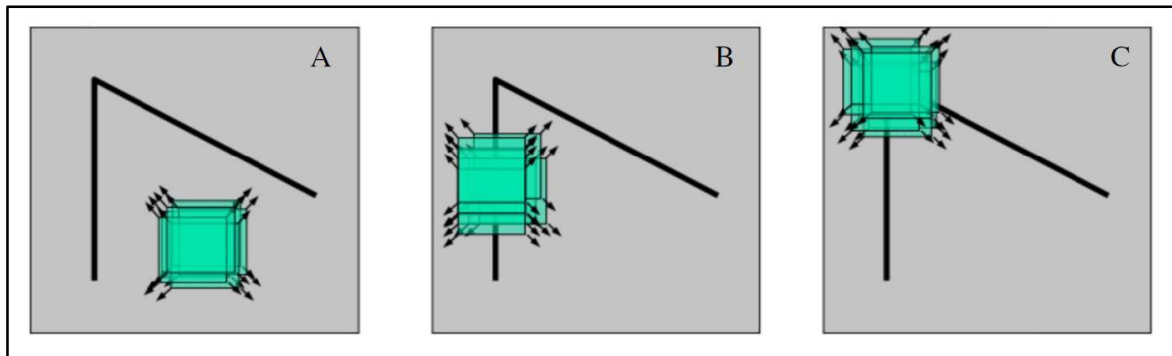


Figura 36: Operatore di Harris: A regione omogenea, B bordo, non ci sono variazioni lungo la direzione del bordo, C angolo, ci sono variazioni significative in tutte le direzioni. fonte: Harris, C., & Stephens, M.(1988). A combined corner and edge detector. Paper presented at the Alvey vision conference

Gli operatori di Hessian si basano sull'uso della matrice Hessiana, matrice alla derivate parziali del secondo ordine, della funzione immagine f .

$$H_f = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Tra gli algoritmi che utilizzano una variante dell'operatore Hessiano si ricordano:

- l'operatore SIFT Scale Invariant Feature Transform
- l'operatore SURF Speeded Up Robust Features
- l'operatore ASIFT

Gli operatori SIFT e SURF associano un *descriptor* ad ogni *feature* estratta dall'immagine; si tratta di un vettore a numero di elementi variabile che descrive la *feature*. La ricerca dei punti omologhi è condotta per comparazione dei *descriptor*.

Nel dettaglio l'operatore SIFT ricerca i punti su regioni ampie dell'immagine superando i problemi di occlusione e deformazione prospettica. Le immagini sono invarianti ai cambiamenti di scala, alla rotazione, e all'illuminazione e i

punti vengono trovati cercando feature stabili su tutte le scale possibili usando la funzione Gaussiana spazio-scala.

Ogni immagine è sottocampionata ad intervalli regolari formando un insieme di immagini convolute dette ottave. I punti di interesse sono i massimi o i minimi ottenuti calcolando le differenze fra gaussiane adiacenti DoG (*Difference of Gaussian*) per ogni ottava; si sta ricercando quindi un punto di massimo o di minimo tra gli 8 pixel adiacenti nella matrice DoG corrente, e nei 9 nella matrice DoG superiore e inferiore, Figura 37. Una volta individuato il punto viene definito un vettore che descrive i gradienti radiometrici nell'intorno del punto di interesse.

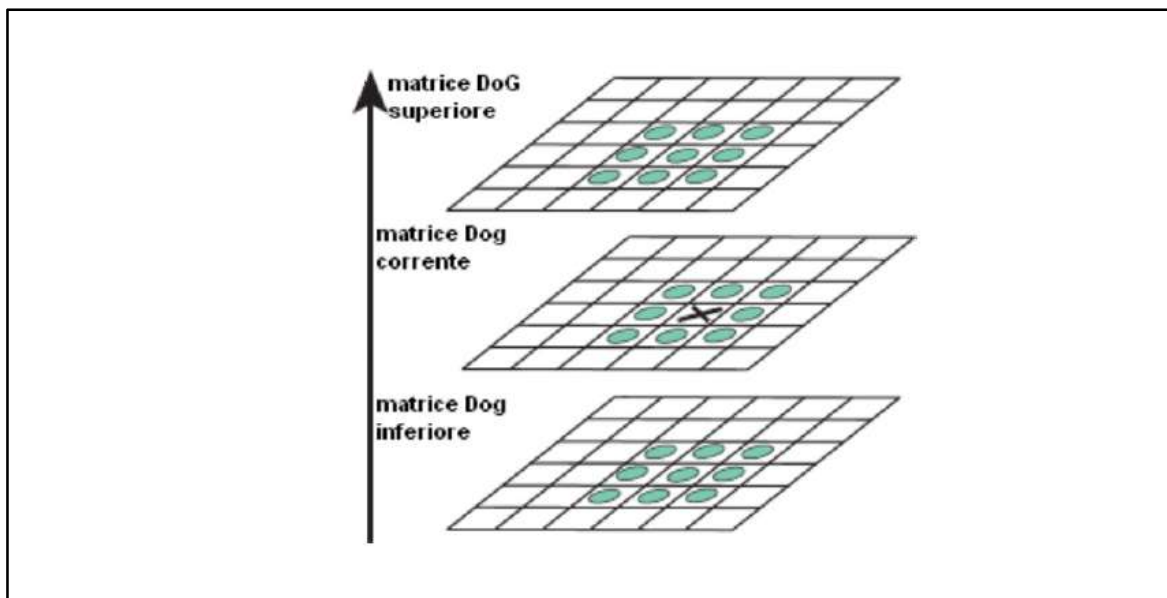


Figura 37: Determinazione dei punti di interesse calcolando la DoG. fonte: Introduzione alla fotogrammetria digitale, Prof. Antonio Zanutta

Raggruppano i vettori di tutti i pixel si forma un istogramma di gradienti orientati i cui picchi rappresentano le direzioni dominanti. La distanza euclidea di questi vettori n-dimensionali permette di individuare i punti omologhi tra le immagini ad esempio con la lenta ma rigorosa *quadratic matching procedure* che compara tutte le combinazioni dei punti di interesse di due immagini e quelli che avranno la minor distanza euclidea dai vettori descrittivi saranno valutati come corrispondenze.

Un'altra correlazione veloce ma approssimativa è la *kd-tree procedure*; si tratta di un albero binario in cui ogni nodo è un punto k-dimensionale

L'operatore SURF è parzialmente ispirato al descrittore SIFT ma secondo i suoi sviluppatori è più veloce, più stabile e più robusto tra diverse trasformazioni di immagini. Per rilevare i punti di interesse l'operatore SURF usa un'approssimazione intera del determinante del rivelatore blob di Hessian che può essere calcolato con tre operazioni interne usando un'immagine integrale precalcolata. Anche il punto di interesse può essere calcolato con l'aiuto di un'immagine precalcolata. Invece di valutare il gradiente degli istogrammi calcola le somme dei componenti del gradiente e le somme dei loro valori assoluti. Le caratteristiche rilevate dalle immagini vengono poi incrociate da algoritmi di matching.

3.1.7 Structure From Motion: Bundler [6] [S.8]

Negli anni '90 la diffusione delle camere digitali nel campo della visione artificiale ha permesso di concentrarsi sull'analisi di sequenze di immagini, affrontando la ricostruzione della *Structure from Motion* (SfM).

La SfM permette, utilizzando l'operatore SIFT o SURF, di risolvere l'orientamento interno ed esterno di un blocco fotogrammetrico con il minor numero di informazioni possibili, utilizza infatti soltanto le *features*, ovvero l'individuazione di corrispondenza.

Il software Bundler, il cui codice sorgente è stato reso disponibile da uno dei suoi sviluppatori, Noah Snavely, permette di calcolare la geometria proiettiva relativa delle immagini così come un set di punti 3D che rappresentano la struttura della scena. Le immagini, che sono acquisite spostandosi attorno alla scena, vengono successivamente sovrapposte assieme grazie alle feature locali di ciascuna immagine facendo poi corrispondere tali punti bidimensionali nelle immagini multiple. In definitiva lo SfM stima il posizionamento dei punti di interesse nelle coordinate di riferimento locale, che prende il nome di spazio modello, producendo una nuvola di punti tridimensionale sparsa che rappresenta la geometria della scena.

In Figura 38 è riportato il Workflow generale per la risoluzione dello SfM.

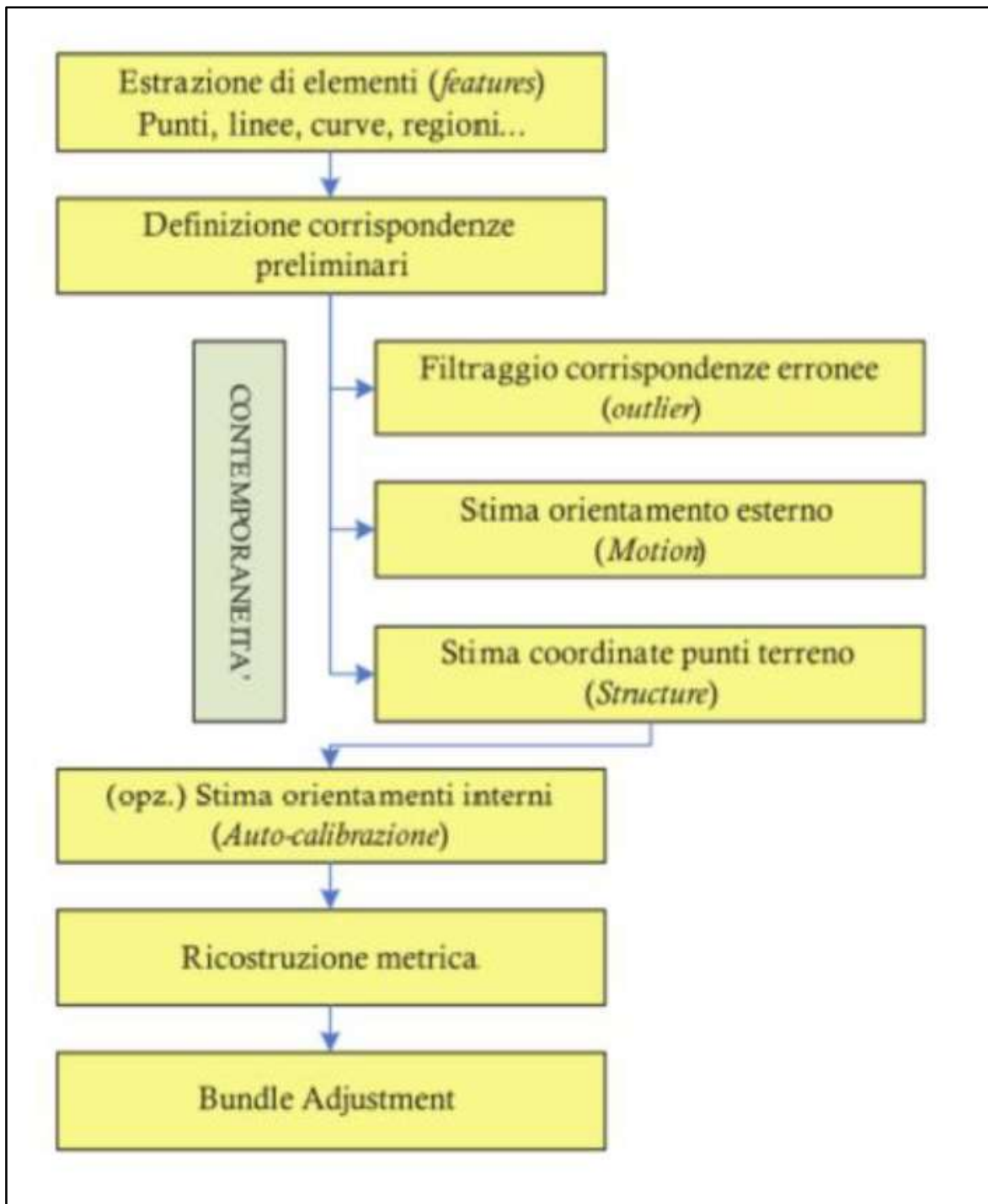


Figura 38: Workflow generale per la risoluzione dello SfM. fonte: Roncella, 2007

3.2 Laser Scanner [7]

Un'altra tecnica di misurazione senza contatto prevede l'utilizzo del laser scanner in grado di rendere il risultato della misura indipendente dalla *texture* del soggetto da riprendere usando luce opportunamente codificata⁸. L'utilizzo del laser è stato dettato dalla possibilità di poter generare spot luminosi estremamente focalizzati a grande distanza.

Il sensore 3D è in grado di suddividere la superficie inquadrata in elementi immagine analoghi ai pixel e per ognuno di questi è in grado di valutarne le coordinate spaziali ed eventualmente il colore.

Il principio del laser scanner è variabile a seconda delle dimensioni dell'oggetto da rilevare e di conseguenza dalla distanza tra sensore ed oggetto: per piccoli oggetti (o distanze ridotte) si utilizzano scanner basati sulla triangolazione mentre per dimensioni maggiori si usano strumenti detti "a tempo di volo" o TOF (*Time of Flight*).

3.2.1 Sensori a triangolazione

I sensori a triangolazione, pur utilizzando lo stesso principio di funzionamento, si distinguono in:

- *Spot* laser
- Lama di luce laser
- Sensori a luce strutturata

Sensori spot laser

Nel caso del laser scanner bastato su *spot* laser si ha che la sorgente genera un puntino luminoso sulla superficie da misurare e una videocamera posta lateralmente alla sorgente riprende l'immagine del puntino costituendo un triangolo, Figura 39.

⁸ La luce codificata contiene un contenuto informativo riconoscibile dal sensore ricevente.

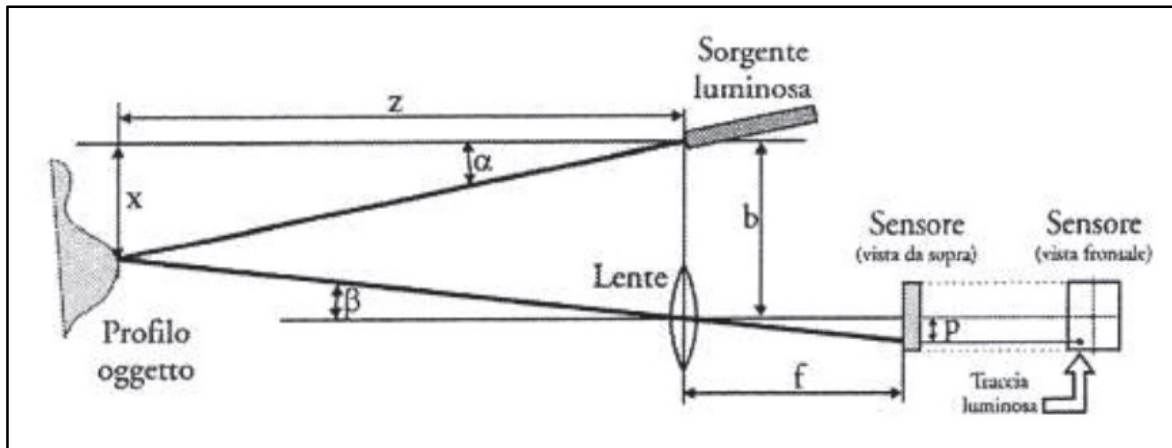


Figura 39: Schema di funzionamento di un laser scanner a triangolazione. fonte Rilievo con laser scanner, Laboratorio di fotogrammetria CIRCE, Università Iuav di Venezia

Con:

b baseline,

f distanza focale,

p distanza tra la traccia della luce e il centro ottico del sistema,

α inclinazione della sorgente luminosa

Se il sistema è stato calibrato b e α sono noti mentre la distanza p viene stimata dal sensore e consente di risalire all'angolo β e quindi agli angoli interni del triangolo

$$\tan\beta = \frac{p}{f} \quad (33)$$

Trigonometricamente si può adesso ricavare la distanza z

$$z = \frac{b}{\tan\alpha + \tan\beta} \quad (34)$$

e infine

$$x = z \cdot \tan\alpha = \frac{b}{1 + \frac{\tan\beta}{\tan\alpha}} \quad (35)$$

Sensore a lama di luce laser

Lo stesso schema può essere applicato ad un insieme di punti allineati costituenti un segmento, generati da uno specchietto rotante o da un cilindro, con la differenza che il procedimento descritto si applica ad ogni singolo punto. In base a come si deforma la lama laser si riesce a ricostruire il profilo dell'oggetto.

In entrambe i casi per acquisire un'area è necessario muovere i sensori in maniera meccanica e controllata; nel caso dei sensori spot sarà necessario realizzare due movimenti, uno lungo x e l'altro lungo y mentre nel caso dei sensori a lama di luce laser si può avere una rotazione o una traslazione della testa della scansione in direzione ortogonale alla proiezione del segmento luminoso.

Sensori a luce strutturata

In questo caso non si ha più la lama laser che si muove orizzontalmente ma grazie ad un apposito proiettore le lame di luce sono prodotte tutte contemporaneamente sotto forma di strisce verticali bianche e nere; l'immagine della superficie investita da questo *patern* luminoso è acquisita con una camera digitale e successivamente viene ricostruita l'immagine in base alla sua deformazione.

I pattern vengono proiettati in sequenza secondo un codice opportuno e ad ogni passaggio il numero di strisce verticali raddoppia fino alla massima frequenza di alternanza tra bianco e nero, quindi all'aumentare del numero di transizioni si otterrà un campionamento spaziale più fine con conseguente aumento della risoluzione, Figura 40.

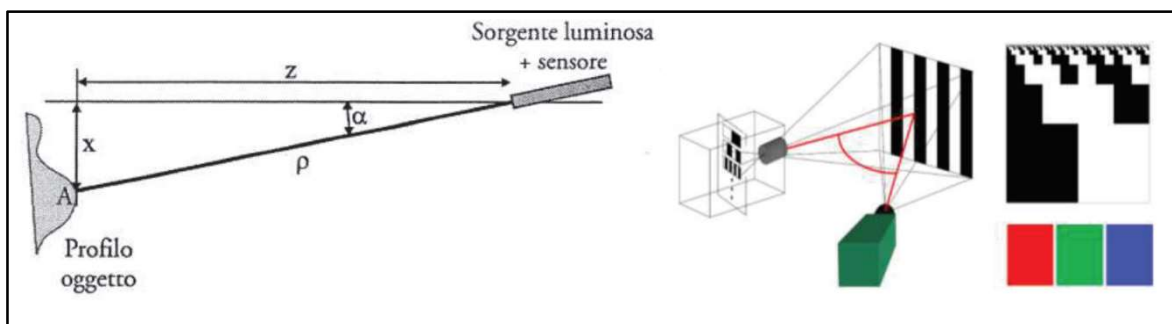


Figura 40: schema di funzionamento di un sensore a luce strutturata. fonte Rilievo con laser scanner, Laboratorio di fotogrammetria CIRCE, Università Iuav di Venezia

3.2.2 Sensori a tempo di volo

Questi sistemi, che derivano dalle stazioni totali, vengono usati per scansionare oggetti di grandi dimensioni. Oltre agli strumenti ottici in grado di misurare con grande precisione la direzione di puntamento si ha un distanziometro che invia un impulso laser misurando il tempo impiegato dalla luce per andare fino alla superficie e tornare allo strumento, per questo sono detti a tempo di volo, Figura 41. Conoscendo la lunghezza d'onda e il tempo di volo si ricava la distanza del punto sull'oggetto dallo strumento e attraverso gli angoli misurati si ottengono le sue coordinate.

$$\begin{aligned}x &= \rho \cdot \sin\alpha \\z &= \rho \cdot \cos\alpha\end{aligned}\quad (36)$$

Questa operazione è automatizzata utilizzando un motore che modifica automaticamente la direzione di puntamento su una zona opportunamente programmabile.

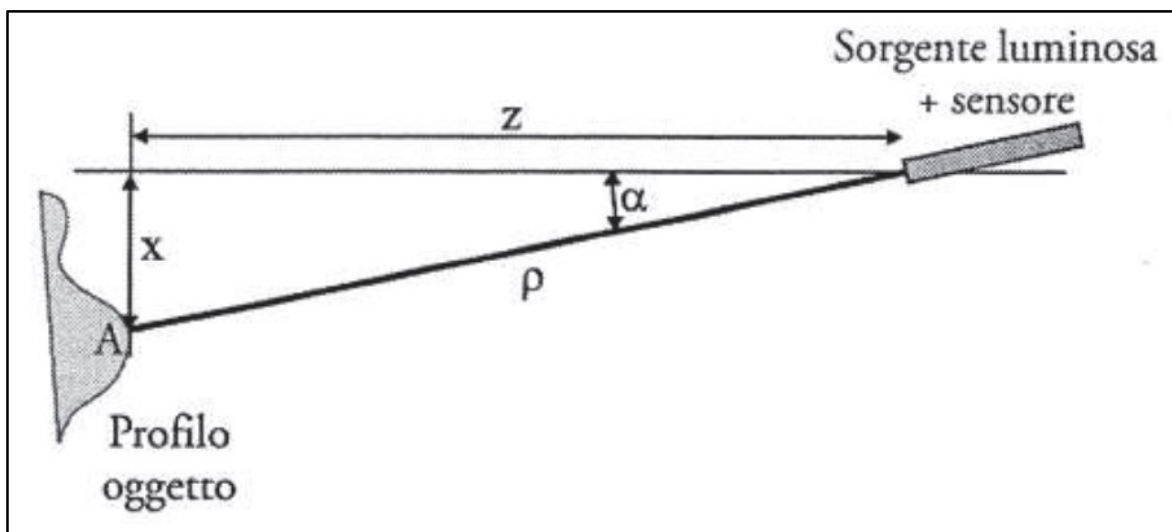


Figura 41: Schema di funzionamento di un sensore a tempo di volo. fonte Rilievo con laser scanner, Laboratorio di fotogrammetria CIRCE, Università Iuav di Venezia

A causa dell'elevatissima velocità della luce i tempi in gioco sono estremamente brevi e ciò si traduce in un'aleatorietà nella stima del tempo di volo e quindi le misure saranno affette da un'incertezza maggiore rispetto agli altri metodi dell'ordine dei 4mm. Tuttavia se l'oggetto di interesse è di grandi dimensioni questa incertezza è meno rilevante.

In particolare per il rilievo del campanile di Sant'Apollinare Nuovo è stato usato il laser scanner terrestre Riegl VZ400 con tecnologia a tempo di volo nella misurazione delle coordinate con:

- Velocità di scansione fino a 122.000 punti al secondo con frequenza di impulsi laser di 300kHz e una precisione dichiarata di 3mm.
- Portata di classe da 1 fino a 600m
- Interfaccia integrata con display a colori 3.5" per la gestione delle funzionalità di bordo

Inoltre per ottenere un'elaborazione dei dati più veloce sono stati aggiunti i seguenti dispositivi integrati:

- GPS con pre-posizionamento delle scansioni in coordinate globali
- Bussola per determinare l'orientamento delle scansioni
- Sensore inclinometrico in grado di correggere la verticale entro $\pm 10^\circ$ con un'accuratezza di $0,008^\circ$
- Piombo laser per materializzare a terra il punto di stazione
- Hard disk per il salvataggio dei dati acquisiti

Si osserva che all'aumentare della distanza dello strumento aumenta il diametro del fascio laser che di conseguenza può colpire più oggetti ed essere riflesso più volte causando un maggior numero di impulsi di ritorno. Questo evento si verifica principalmente in prossimità dei bordi e in presenza di ostacoli.

CAPITOLO 4

Breve descrizione dei software utilizzati

4.1 Autodesk ReMake [S.11]

ReMake è un software della famiglia Autodesk in grado di convertire un rilievo fotografico, con laser scanner o con 3D scanner in *mesh* 3D di alta qualità. Il programma risulta molto intuitivo e presenta una serie di *tools* per pulire, modificare, riparare, correggere e analizzare le maglie tridimensionali ottenute.

Con Remake oltre ad essere possibile impostare unità e scala, sistemi di coordinate, inserire punti di coordinate, misurare distanze e superfici è possibile esportare la *mesh* con una diversa percentuale di compressione e in diversi formati compatibili con una vasta gamma di software CAD.

Per questo lavoro di tesi è stata utilizzata una licenza per studenti che presenta solo alcune limitazioni, tuttavia si fa notare che con la versione pro è possibile comparare due modelli ottenuti da rilievi differenti e questo potrebbe tornare utile per un eventuale confronto tra rilievi eseguiti in tempi differenti ad esempio in caso di monitoraggio di strutture.

Una enorme potenzialità di questo software è data dalla possibilità di elaborare i dati in remoto; per ottenere risultati in tempi brevi è infatti necessario di disporre di un computer con un processore potente e almeno 16GB di memoria RAM ma Autodesk permette di caricare sulla pagina utente online il rilievo fotografico e di utilizzare il server per tutte le operazioni di *Image Matching* permettendo di scaricare direttamente il file con la *mesh* rendendo di fatto accessibile a tutti questa tecnologia.

Sul sito del produttore si trova il flusso di lavoro del programma, Figura 42.

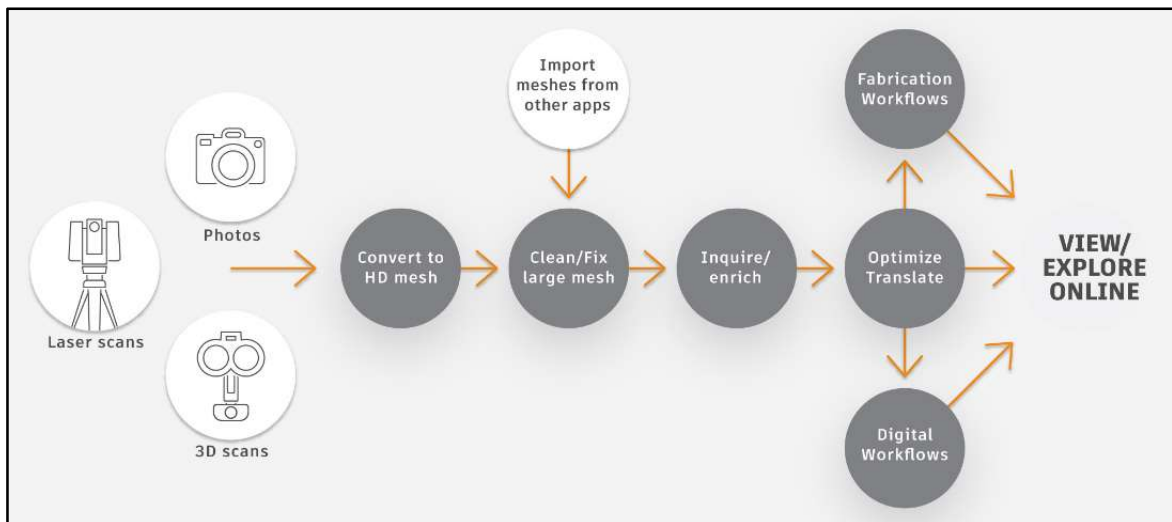


Figura 42: Flusso di lavoro (workflow) di Remake. Fonte: <http://remake.autodesk.com/about>

4.2 Rapidform XOR3 [S.10]

Rapidform XOR3 è la terza versione del software di *reverse engineering* della Inus Technology Inc. (oggi l'azienda è stata acquisita dalla *Geomagic* e l'ultima versione del programma prende il nome di *Design X*). L'applicazione è utile per la creazione di modelli CAD 3D da dati di scansione creando modelli solidi parametrici di qualsiasi oggetto fisico.

Una grande potenzialità di questo software è di mantenere inalterato l'albero originale durante il trasferimento in altre applicazione CAD, consentendo di modificare i modelli come qualsiasi altra piattaforma in CAD, inoltre i modelli possono essere salvati in numerosi formati garantendo l'uso con altri software dedicati.

4.3 Rhinoceros5 [S.9]

Rhinoceros, noto anche come Rhino, è un software CAD della Robert McNeel & Associates molto impiegato per la modellazione *NURBS* tridimensionale di oggetti anche molto complessi. [S.13] Il termine *NURBS* è l'acronimo di *Non Uniform Rational Basis-Splines* cioè Splines razionali non uniformi definite da

una base e sono una classe di curve geometriche utilizzate in computer grafica per rappresentare curve e superfici. La potenzialità di questo software risiede nel gran numero di strumenti messi a disposizione dell'utente per trattare tali oggetti consentendo di poter realizzare anche prototipi 3D.

Un'altra grande potenzialità di questo software sta nella possibilità di poter esportare il lavoro in un elevato numero di formati consentendo quindi un'ottima interoperabilità con programmi dedicati alle più svariate discipline sia dell'ingegneria civile e meccanica ma anche dell'architettura, del design, dell'oreficeria ect.

Rhinoceros integra perfettamente modellazione solida e di superficie: il concetto cardine è che il software interpreta una superficie chiusa come un solido, consentendo quindi l'uso sul modello solido delle operazioni effettuate tra le superfici, ovvero operazioni eseguibili di solito unicamente tra solidi, ad esempio le operazioni booleane di unione, sottrazione e intersezione.

4.4 Midas NFX e GEN

Midas Information Technology Co. è un'azienda produttrice di software dedicati all'ingegneria civile e meccanica fondata nel 1989. GEN è il programma specifico per l'ingegneria civile mentre NFX è quello dedicato all'ingegneria meccanica, tuttavia per questa tesi è stato usato principalmente NFX in quanto possiede al suo interno un potente meshatore 3D al contrario di GEN che necessita di un software esterno chiamato FX+ che richiede un'altra licenza per il suo utilizzo.

NFX è una suite di simulazione multidisciplinare che permette di accedere sia alla simulazione strutturale che alla simulazione fluidodinamica dove è stato possibile importare l'oggetto tridimensionale, assegnare i materiali con le rispettive proprietà, i vincoli e i carichi che hanno consentito attraverso un solutore di osservare i comportamenti della struttura come gli spostamenti e la distribuzione delle tensioni.

Per poter rivolgersi ad un più ampio numero di utenti il software può essere usato in due modalità operative:

- La modalità Designer che permette di realizzare delle simulazioni più semplici attraverso un'interfaccia semplificata
- La modalità Analyst che invece possiede un'interfaccia completa che consente di controllare il modello a 360° permettendo anche di generare materiali particolari attraverso le curve di sforzo-deformazione e di realizzare mesh manualmente attraverso operazioni booleane.

Anche usando la prima modalità è comunque possibile accedere a tutte le possibili soluzioni ottenibili dalla modalità Analyst.

Le informazioni del modello FEM sono gestite attraverso una logica ad albero: l'albero del modello con tutte le informazioni della mesh del materiale e le sue proprietà, l'albero delle condizioni al contorno dove sono presenti ad esempio i vincoli e i carichi e infine l'albero dei risultati.

4.5 Autodesk Revit

Revit 2017 è il programma BIM di Autodesk pensato per la progettazione Architettonica, Strutturale e Meccanica. Come è già stato visto nel capitolo dedicato al BIM questi software possiedono una libreria di oggetti pronti all'uso ma anche la possibilità di crearne di personalizzati.

[S.12] È importante prendere confidenza con la terminologia di questo software che suddivide gli oggetti in “Famiglie”. Ne esistono di tre tipi:

- Famiglie di SISTEMA alla quale appartengono gli elementi strutturali dell'edificio come muri, solai, pilastri, travi tetti, scale, fondazioni e terreni.
- Famiglie CARICABILI nelle quali si trovano tutti gli elementi non strutturali come porte, finestre, impianti, arredi etc.
- Famiglie LOCALI dove si trovano gli elementi modellati specificatamente dall'utente.

Un altro concetto fondamentale da imparare è la differenza tra TIPO e ISTANZA:

In ogni famiglia sono presenti oggetti diversi, ad esempio nella famiglia muri si trova il muro con spessore 10 cm, 25 cm, 30 cm etc., questi oggetti sono detti tipi, sono cioè le differenze tra oggetti della stessa famiglia.

Quando si parla di istanza si intende invece la caratteristica di un singolo oggetto.

Quindi se modifico il tipo di oggetto, ad esempio il materiale del muro da 30 cm, automaticamente andrò a modificare il materiale di tutti i muri di quel tipo presenti nel modello, al contrario se si intende modificare ad esempio lo spessore di un singolo muro si farà una modifica di istanza.

CAPITOLO 5

Sperimentazione di procedure di modellazione a partire da nuvole dense di punti

In questo capitolo verranno esposti i procedimenti per realizzare un rilievo di una struttura con metodi avanzati quali il *laser scanning* e la fotogrammetria. La realizzazione di un modello tridimensionale di una struttura mediante una nuvola di punti è rimasta per molto tempo solo una teoria a causa dell'enorme mole di dati che è necessario gestire, infatti per realizzare una mesh tridimensionale, per poterla gestire e modificare è necessaria una rilevante potenza di calcolo e una ancora maggiore capacità di memoria *RAM*.

I metodi di rilievo senza contatto presentano l'evidente vantaggio di poter misurare in modo estremamente preciso anche zone in quota che altrimenti sarebbero difficilmente raggiungibili; l'esempio forse più esplicativo riguarda la possibilità di montare una fotocamera su un drone e di acquisire un gran numero di fotogrammi sia della facciata esterna che della copertura dell'edificio in tempi e costi decisamente minori rispetto ai metodi tradizionali e il tutto mantenendo l'operatore a terra in condizioni di assoluta sicurezza.

Per questi motivi risulta di notevole interesse lo studio di un procedimento che renda possibile riportare un rilievo laser o fotogrammetrico in software in grado di realizzare un modello tridimensionale che sia preciso e facilmente gestibile utilizzando la moderna metodologia BIM attraverso la quale i singoli tecnici potranno successivamente operare nelle rispettive discipline.

Il numero di stazioni da effettuare con lo strumento sono in genere inferiori al numero di misure che sarebbe necessario effettuare tradizionalmente, questo si traduce in una riduzione di eventuali errori dell'operatore, dovuti ad esempio alla stanchezza o alla modifica delle condizioni atmosferiche, mentre l'automatismo della procedura evita errori grossolani che richiederebbero di ritornare in situ. Un altro punto a favore di questi strumenti, se utilizzati correttamente, riguarda la loro precisione che consente di generare nuvole di punti molto dense con un errore inferiore ai 3 mm che consentono quindi un

grado di dettaglio molto elevato che può essere utile nello studio del quadro fessurativo della struttura.

Infine questo tipo di acquisizione generando un modello tridimensionale della struttura si presta ad essere utilizzato con la metodologia BIM che, anche in seguito all'introduzione del nuovo Codice appalti (dlgs 50/2016), sta prendendo sempre più piede in Italia.

Nel paragrafo successivo verranno illustrati i passaggi principali necessari per convertire la mesh ottenuta da una nuvola di punti in una superficie chiusa per poi eseguire l'analisi agli elementi finiti. Tale procedura è stata chiamata **CSF** dall'acronimo dei suoi step principali, Cloud – Solid – FEM.

5.1. Fase 1: Determinazione della procedura CSF su una struttura di piccole dimensioni, la fontanella del giardino “Villa Cassarini”

Nell'ottica di ricondursi ad un caso che fosse il più semplice possibile per studiare la realizzabilità di questa procedura si è scelto di rilevare un oggetto di piccole dimensioni che fosse facilmente raggiungibile in ogni sua parte, in particolar modo nella parte superiore, senza dover ricorrere a impalcature o a droni. In questo modo si sarebbe potuto ottenere una nuvola di punti sufficientemente continua e successivamente una mesh priva di difetti. La fontanella di un giardino pubblico è stata quindi ritenuta la scelta più opportuna per iniziare questo lavoro sperimentale.

Il rilievo è stato realizzato mediante 124 scatti realizzati con una fotocamera digitale compatta Casio Exilim con le caratteristiche riportate in Tabella 2:

Risoluzione	7,2 Mpixel
Distanza focale	Variabile da 6,3 a 18,9 mm (utilizzata 6,3mm)
Esposizione	1/640 s
Dimensione dell'immagine	3072x2304
Zoom ottico	3X (6 lenti in 5 gruppi con lente asferica)

Tabella 2: Caratteristica Fotocamera Casio Exilim

L'acquisizione è stata effettuata compiendo tre giri attorno all'elemento sorreggendo la fotocamera ad ogni giro ad un'altezza diversa partendo dall'alto verso il basso. In seguito sono stati eseguiti degli scatti ravvicinati per catturare correttamente i dettagli della vasca, sia internamente che esternamente, e l'intradosso dell'arco. In Figura 43 si può osservare la disposizione dei punti di presa attorno all'oggetto.

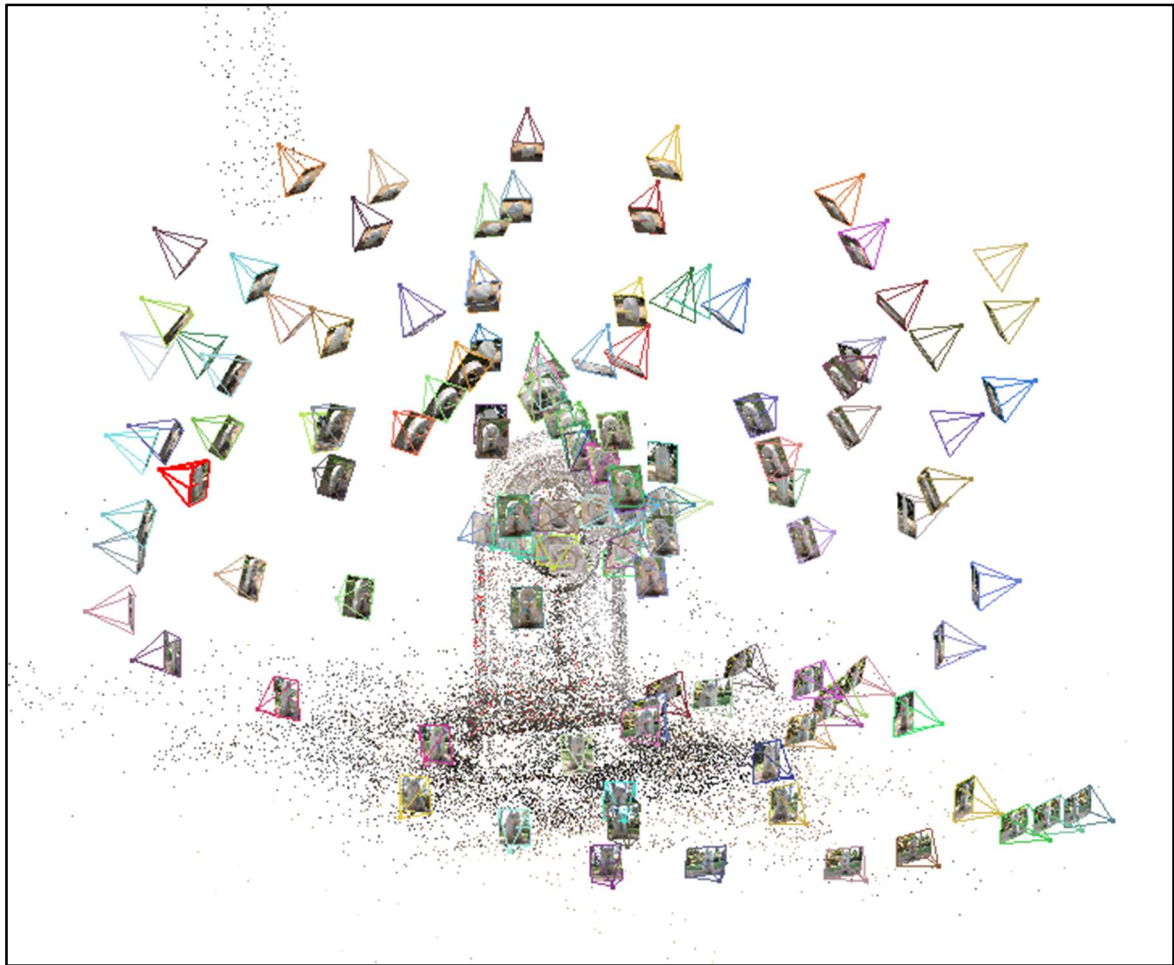


Figura 43: Nuvola di punti della fontanella con vista dei punti di presa

Di seguito vengono presentati tre metodi: il primo prevede di creare la mesh e successivamente il volume direttamente dalla nuvola di punti ottenendo quindi un solido costituito da un unico elemento al quale sarà possibile assegnare un solo materiale. Il secondo metodo prevede di costruire un modello sfruttando un software BIM ma anche in questo caso esso sarà costituito da un unico oggetto e quindi da un unico materiale, infine con il terzo metodo si costruirà

un modello BIM composto però da più parti alle quali sarà possibile assegnare materiali e proprietà differenti.

5.1.1. Metodo 1: Creazione del modello dalla nuvola di punti

Acquisizioni delle immagini e creazione del modello 3D – Fase “Cloud”

Per questa fase è stato usato Recap 360 della Autodesk. Una volta installato sulla macchina locale il software consente di caricare i dati del rilievo fotografico sul proprio account di Autodesk cliccando su “progetto fotografico” o “scansione progetto”. È anche possibile aprire un progetto salvato in precedenza agendo sull'icona a forma di cartella, Figura 44.

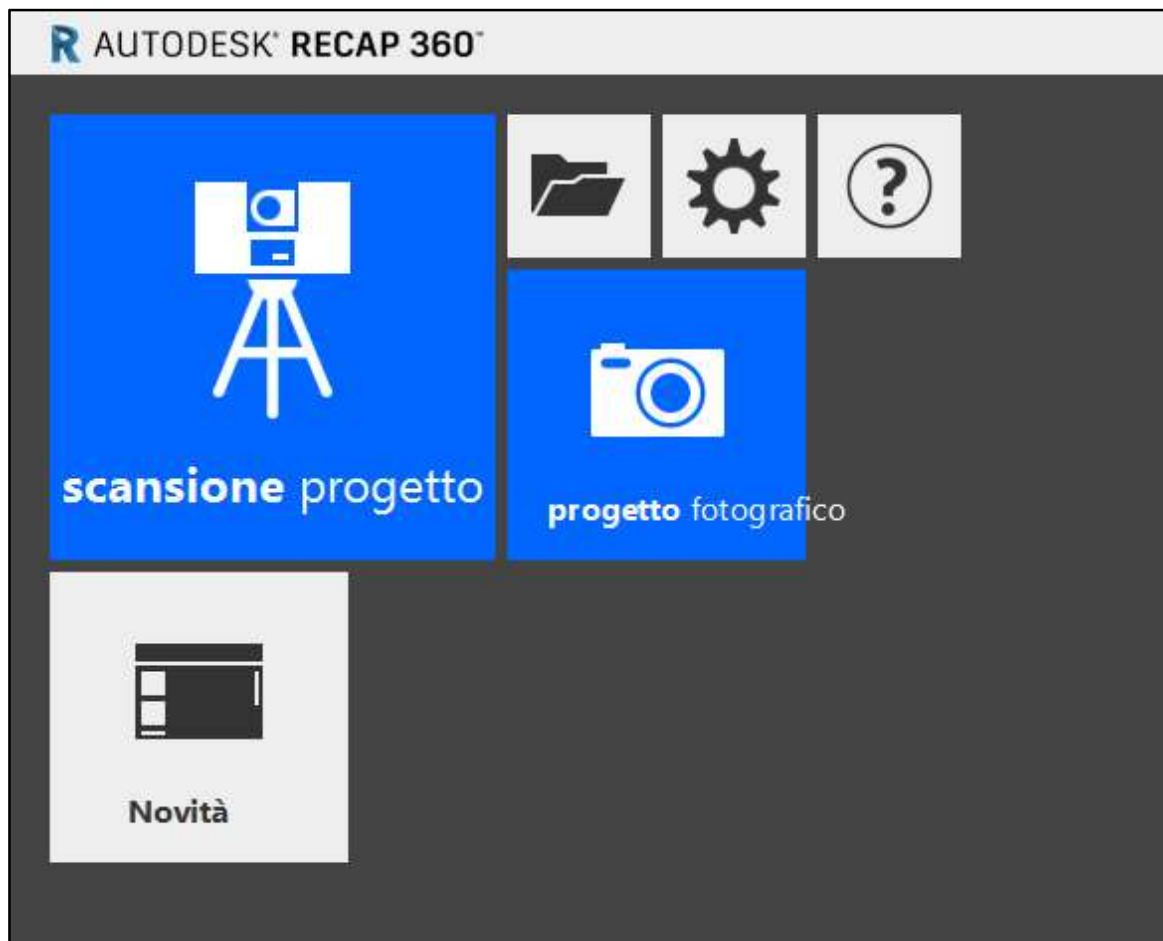


Figura 44: Schermata iniziale di Autodesk Recap 360

Successivamente si viene indirizzati online, Figura 45, dove come primo punto viene richiesto di caricare le immagini dell'oggetto da ricostruire mentre nel secondo passaggio, che è facoltativo, il sistema richiede di selezionare alcuni punti omologhi su più fotogrammi. Questa procedura torna utile nel caso il software non riuscisse automaticamente a riconoscere i *pattern* omologhi. Sempre in questa fase è possibile imporre una scala che è comunque possibile modificare anche agendo direttamente sulla mesh nei passaggi successivi. Il terzo punto invece è automatico e consiste nell'elaborazione in remoto delle immagini. Il software consente anche di elaborare le immagini in locale a condizione che il computer abbia caratteristiche adeguate attualmente sensibilmente superiori alla media dei pc domestici. La possibilità di elaborare in remoto le immagini risulta quindi una potenzialità davvero notevole di questo programma.



Figura 45: Cloud di Autodesk Recap 360 per caricare le immagini

Alla fine del processo di elaborazione sulla schermata principale è possibile trovare il modello 3D pronto per essere scaricato sulla macchina locale in uno dei formati disponibili: l'estensione "rcs" permette di aprire il modello nuovamente con Recap, mentre l'estensione "rcm" permette di lavorare con Autodesk Remake che risulta essere molto interessante per i diversi *tools* utili per modificare la mesh.

Si osserva che per ottenere entrambe i formati sarà necessario selezionarli nell'apposito menu del secondo punto, in caso contrario sarà necessario rilanciare l'esecuzione del modello dall'inizio.

Modifica del modello 3D con Autodesk Remake e Rhinoceros5 – Fase “Solid”

Il modello realizzato da Recap, Figura 46, necessita di alcune operazioni da parte dell'operatore atte ad eliminare le zone non interessanti, chiudere le zone aperte della mesh dovute ad oclusioni prospettiche e a verificare infine che la mesh non presenti errori come buchi o intersezioni di facce che creerebbero numerosi problemi durante le fasi successive.



Figura 46: Il modello appena importato presenta il terreno che andrà eliminato e un'apertura sul fondo a causa dell'impossibilità di fotografare la parte interrata

Il terreno attorno all'oggetto può essere agevolmente rimosso selezionando la zona ed eliminandola premendo il tasto *canc* della tastiera, successivamente si andrà ad agire sul comando *edit*, rappresentato in figura da una matita, all'interno del quale ci sono i seguenti azioni mostrate anche in Figura 47:

- *Slice*, per creare una sezione dell'oggetto
- *Surface tools*, per modificare la superficie rendendola più liscia oppure traslandola per creare o eliminare delle sporgenze
- *Smooth boundary* per regolarizzare i bordi della mesh
- *Bridge*, per collegare due bordi disgiunti

- *Extrude*, per estrarre il bordo della mesh del valore specificato
- *Fill hole*, per chiudere i buchi nella mesh.

Data la sua importanza per i passaggi successivi è utile entrare nel dettaglio dell'ultimo comando. Con questa azione si va a riempire lo spazio vuoto tra i bordi chiusi di una mesh (in caso di bordi disgiunti si utilizza il comando *bridge*). È possibile forzare l'interpolazione su un piano passante per tali bordi, come è stato fatto nell'immagine seguente usando l'opzione *flat*, mentre con l'opzione *smooth* si andrà a creare un raccordo tra di essi probabilmente agendo sulla normale delle singole facce.

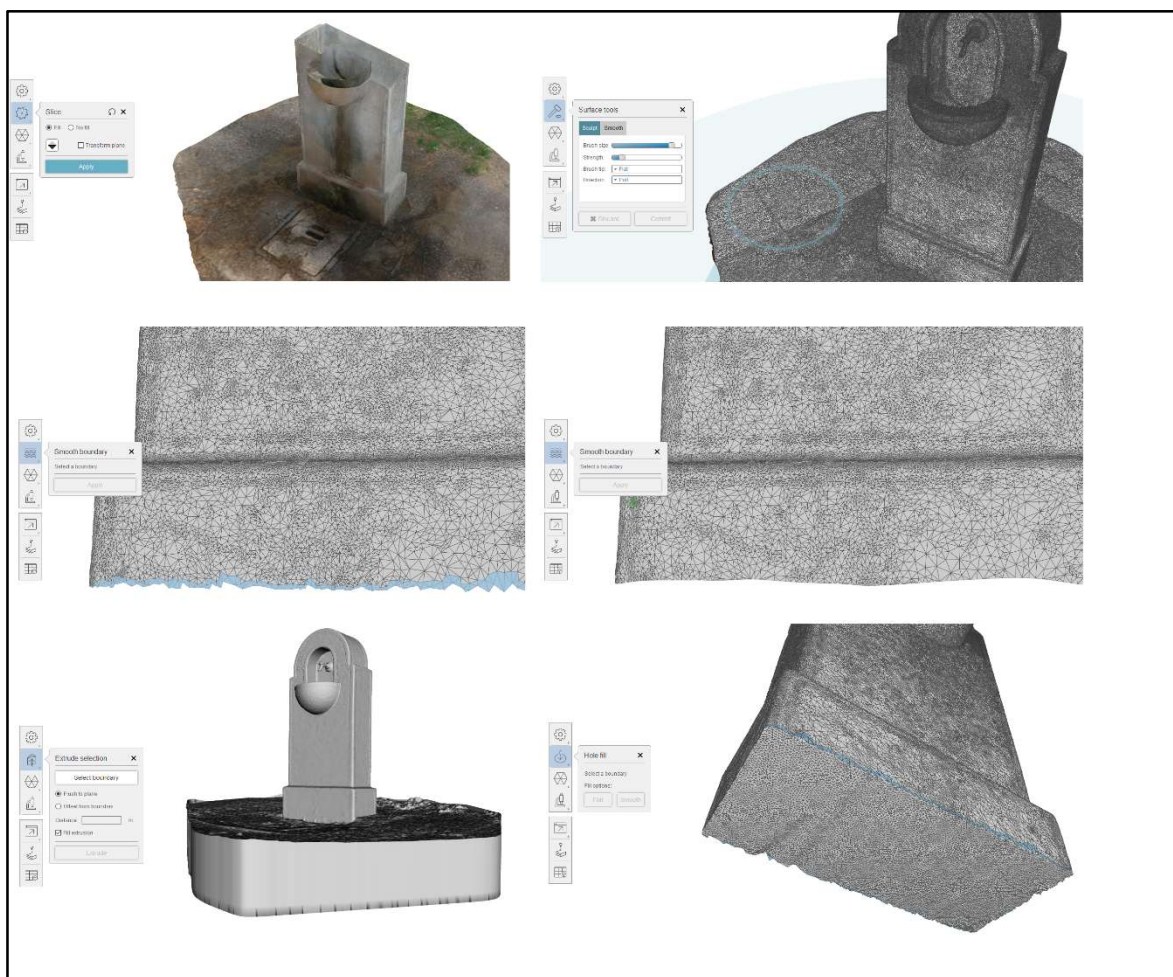


Figura 47: Comandi di Autodesk Remake per la modifica della mesh. In alto i comandi slice e surface, in centro la modifica del bordo di base ad opera del comando smooth boundary, in basso il comando extrude e fill hole.

A questo punto è possibile eseguire il comando diagnostica, Figura 48; la sua funzione è di analizzare la mesh per cercare eventuali difetti che potrebbero compromettere la stampa tridimensionale del modello. La mesh può essere affetta da

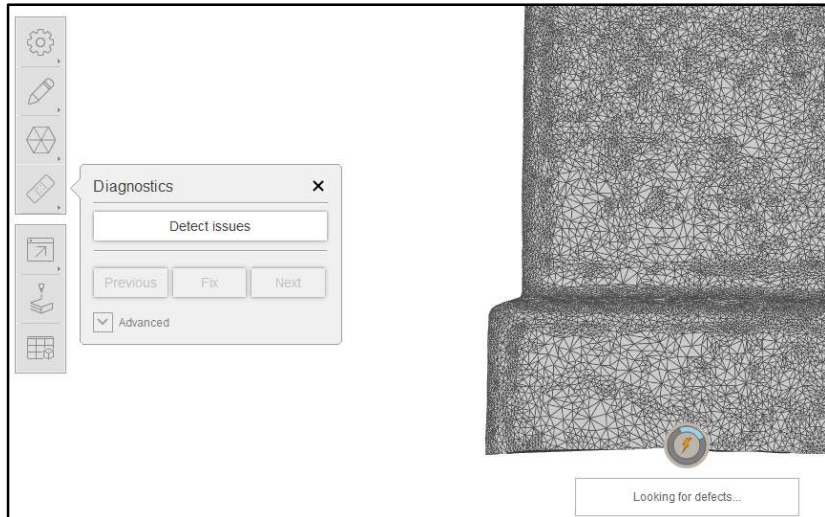


Figura 48: Diagnostica con Autodesk Remake

diversi difetti ma Remake non specifica nel dettaglio quali stia ricercando, per questo motivo il modello è stato esportato in alta qualità in formato “obj” per essere aperto con Rhinoceros5 (della softwarehouse McNeel North America) ed essere ulteriormente verificato in questo caso con esito positivo. Il comando di “verifica oggetti” si trova nel menu “strumenti mesh”: il primo tasto da sinistra, a forma di spunta, esegue unicamente la verifica dell’oggetto, quello subito a destra, a forma di chiave inglese, oltre ad eseguire la verifica permette di selezionare le eventuali voci di errore e di correggerle, Figura 49.

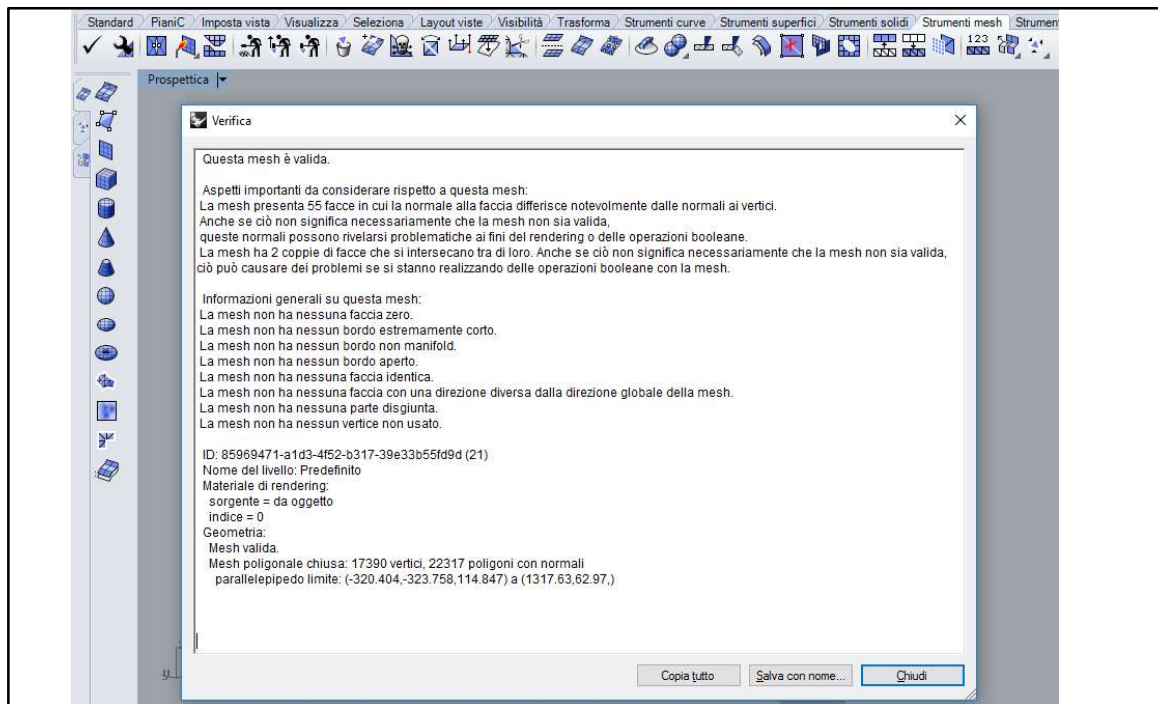


Figura 49: Diagnostica con Rhinoceros5

Successivamente si è eseguita anche la scalatura della mesh. Digitando il comando “misura” è stato possibile trovare la lunghezza sul disegno di un lato noto e tramite una semplice proporzione è stato ricavato il fattore di scala da applicare. Si è quindi digitato il comando “scala” ed imposto il fattore di scala voluto.

Successivamente digitando il comando ruota si è reso l’oggetto coerente col sistema di riferimento globale, Figura 50. Questa operazione non influisce sui passaggi successivi ma rende più agevole la navigazione utilizzando le viste predefinite (superiore, frontale e destra).

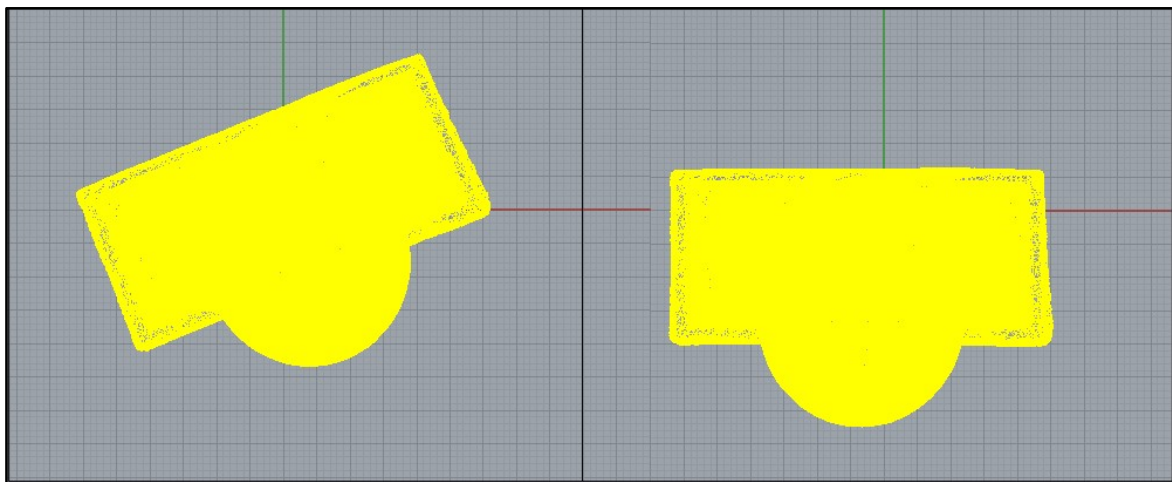


Figura 50: Rotazione della mesh in Rhinoceros5 attraverso il comando "ruota"

Trasferimento del modello 3D in un software FEM – Fase “FEM”

Si vuole adesso importare il modello in un software FEM allo scopo di poter eseguire delle simulazioni strutturali; in questo studio si è utilizzato Midas NFX. La scelta di questo software nonostante non sia la versione ottimizzata per l’ingegneria civile ma per l’ingegneria meccanica è stata dettata dall’efficacia e dalla facilità di utilizzo del meshatore 3D. La meshatura 3D è un punto chiave del procedimento per poter ottenere dei risultati con il metodo degli elementi finiti ed è necessario che il solido non presenti aperture e penetrazioni.

Prima di importare il modello in Midas NFX è però necessario eseguire alcune operazioni preliminari in Rhinoceros.

Innanzitutto è necessario ridurre drasticamente il numero di poligoni della mesh altrimenti il file risulterebbe troppo pesante per essere elaborato. Per fare questo dal menu “strumenti mesh” si seleziona il comando “riduci poligoni della mesh” (è anche possibile digitare RiduciMesh nella barra di comando).

Si è proceduto per prove partendo da una riduzione del 75% fino a trovare la massima dimensione gestibile da Midas NFX. È risultato che la riduzione percentuale adatta è del 95%, Figura 51. I tempi di elaborazione sono stati molto rapidi e quindi è stato possibile selezionare la massima accuratezza possibile.

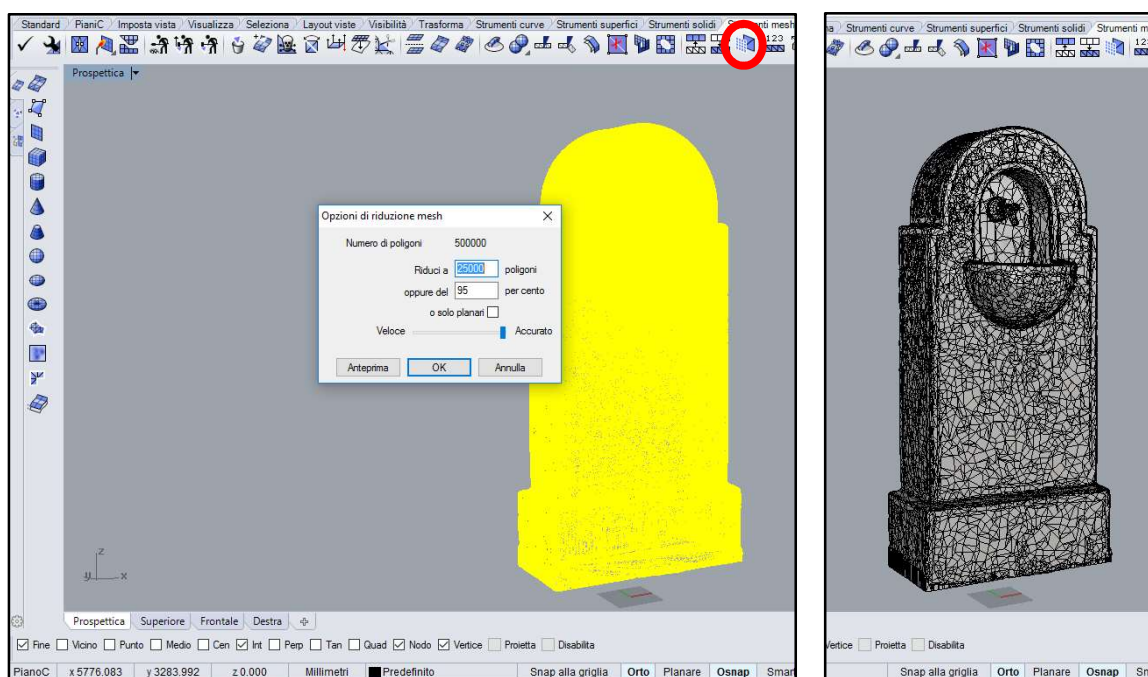


Figura 51: Nel cerchio rosso il comando per ridurre il numero di poligoni; in questo caso si è effettuata una riduzione del 95% selezionando la massima accuratezza. A destra il modello dopo la riduzione.

Il passaggio successivo è quello di generare dalla mesh 3D una polisuperficie che possa essere esportata in formato ACIS caratterizzato dall'estensione “sat”. L'operazione è automatica una volta selezionato il comando “polisuperficie da mesh” dal menu “strumenti mesh” o in alternativa digitando nella riga di comando “MeshToNurb”. Infine, dopo aver selezionato la polisuperficie, dal menu file si clicca su “esporta selezione” salvando il file in formato ACIS Predefinito, Figura 52.

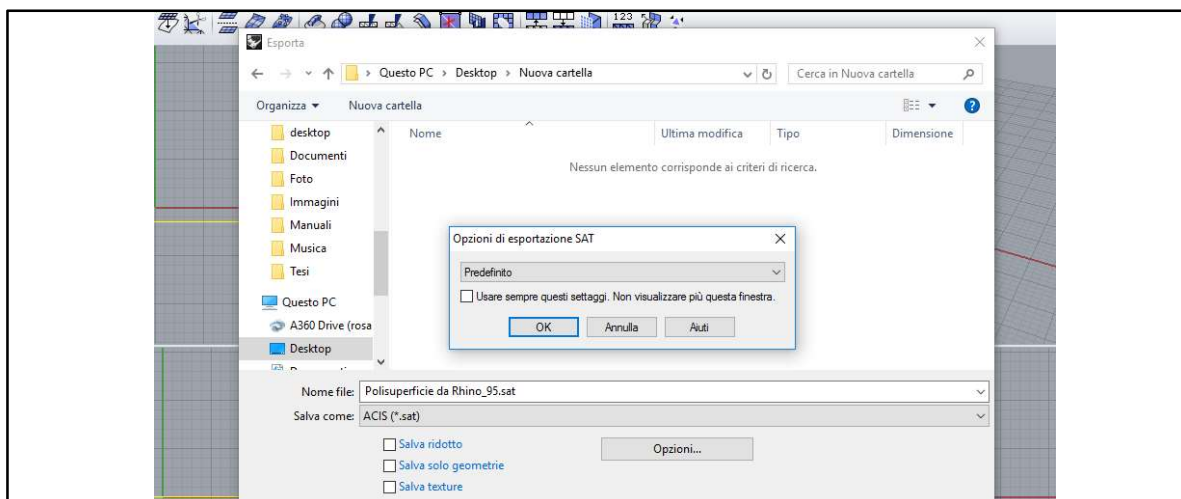


Figura 52: Esportazione della polisuperficie in formato ACIS

Una volta lanciato Midas NFX sarà sufficiente creare un nuovo file e selezionare il comando “*Import*” dal menu “*Geometry*” e selezionare il file appena creato, Figura 53.

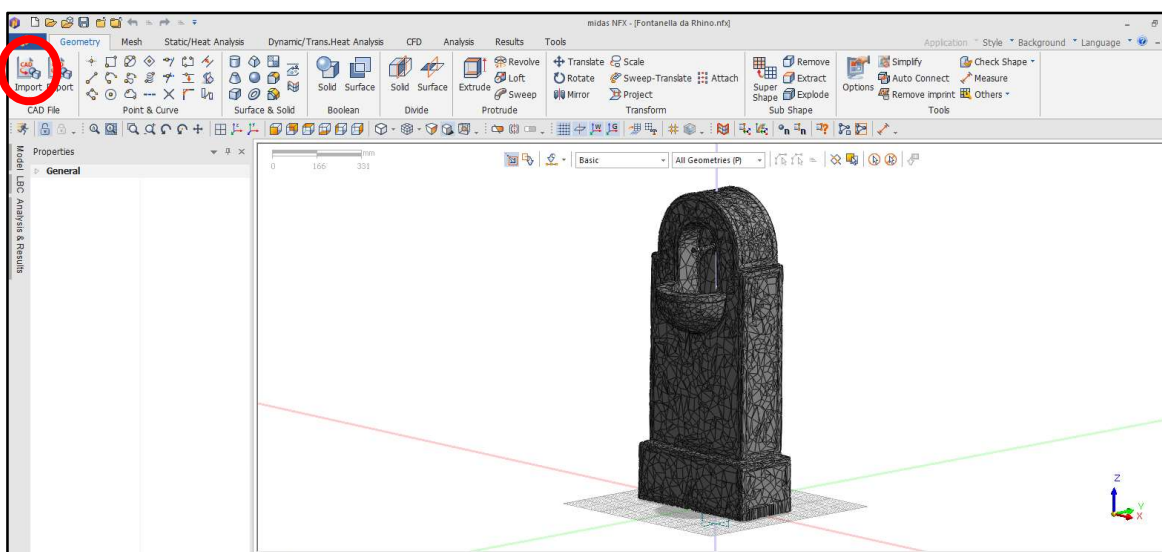


Figura 53: Schermata iniziale di Midas NFX dopo l'importazione del modello. Nel cerchio rosso il comando *Import* per importare il file ACIS.

Da questo momento si entra nel campo strutturale; si inizia creando il materiale della struttura e le sue proprietà. Per fare ciò si entra nel menu “*Mesh*” subito a destra del menu iniziale, i primi due tasti sono proprio “*Matl.*” per il materiale e “*Prop.*” per le proprietà. Cliccando sul primo si apre una finestra che sulla destra presenta il tasto “*create*” dal quale si apre un menu a tendina che

permette di scegliere le caratteristiche meccaniche desiderate. In questo caso si è scelto di creare un materiale con comportamento isotropo, Figura 54.

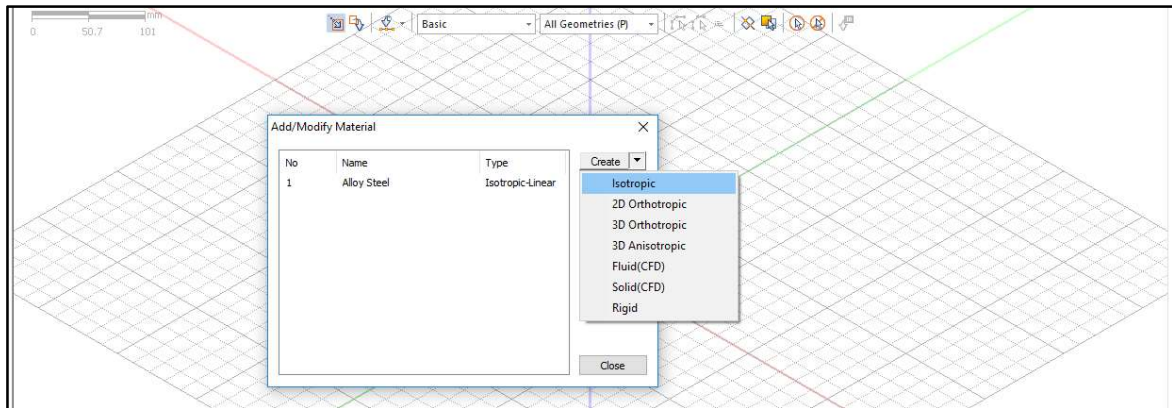


Figura 54: Menu per la selezione del comportamento del materiale

Selezionando Isotropic si apre una finestra dove è possibile scegliere uno dei materiali presenti nella libreria o, come si è fatto, inserire manualmente le proprietà desiderate, Figura 55. È stato creato un calcestruzzo C28/35 con:

modulo elastico $E = 23300 \text{ MPa}$

coeff. di Poisson = 0.2

massa 24 kN/m^3

resistenza di calcolo a compressione $f_{cd} = 15.84 \text{ MPa}$

resistenza di calcolo a trazione $f_{ctd} = 1.29 \text{ MPa}$

richiedendo un comportamento fragile

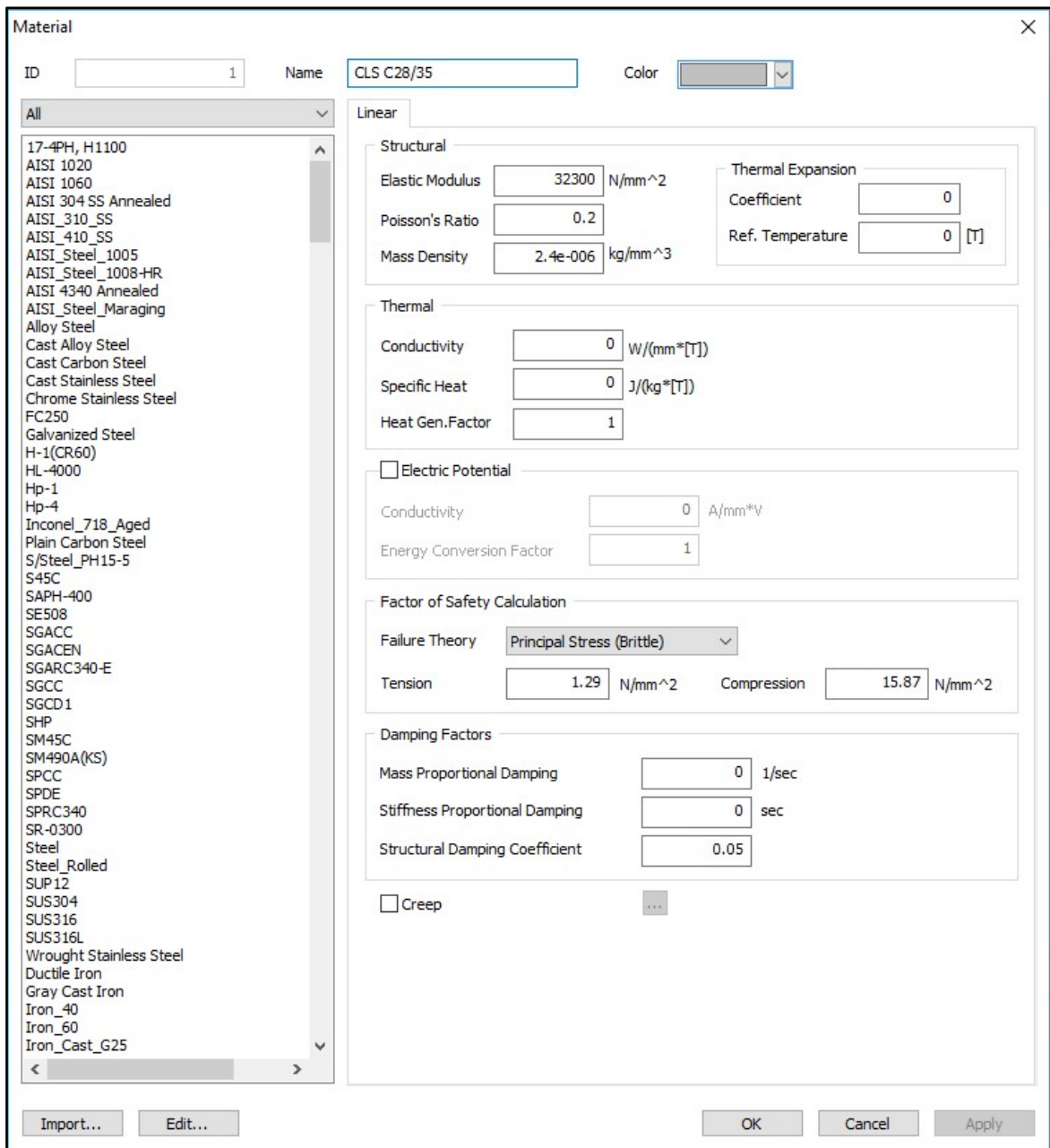


Figura 55: Tabella delle proprietà dei materiali in Midas NFX

Una volta salvate le modifiche è necessario accedere al menu “Prop.”. Si vuole associare il materiale appena creato ad un oggetto tridimensionale quindi sarà necessario selezionare il tasto “create” e dal menu che si apre l’opzione “3D”, Figura 56.

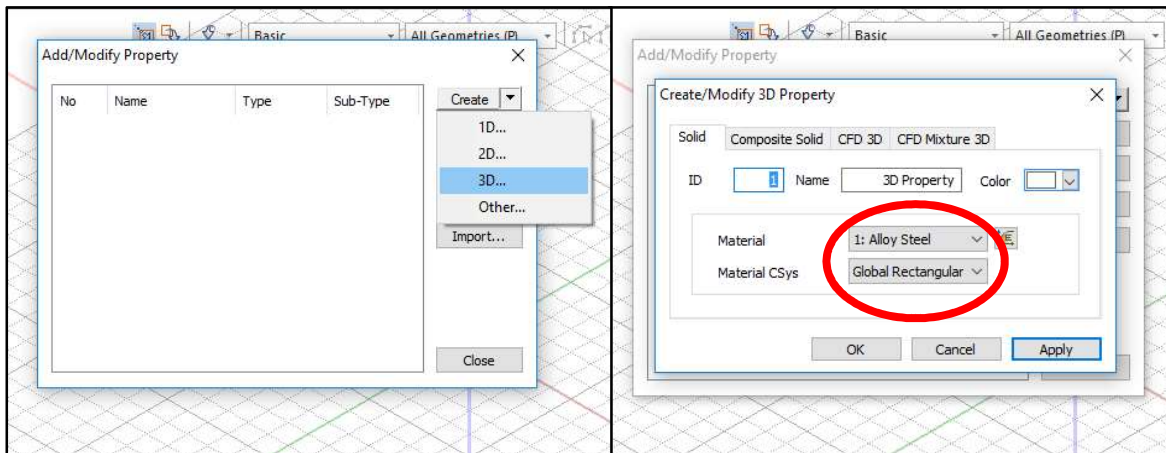


Figura 56: A sinistra il menu per creare l'oggetto 3D, a destra, nel cerchio rosso, la finestra per associare il materiale creato in precedenza.

Ora è possibile assegnare il materiale al solido, per farlo è sufficiente selezionarlo e dalla scheda “*Properties*” a sinistra selezionare la casella affianco alla voce “*material*” e scegliendo quello desiderato. Successivamente agendo sul tasto “3D”, evidenziato in Figura 57 con un cerchio rosso, si accederà alla finestra per creare una mesh tridimensionale all’interno dell’oggetto.



Figura 57: Assegnazione del materiale alla Mesh

Si nota dalla figura che sono presenti diverse opzioni ma dopo alcune prove la più comoda è risultata quella denominata “Auto-Solid”. È infatti sufficiente selezionare l’oggetto e imporre dalla voce “Size” la dimensione degli elementi, Figura 58. In genere non conviene discostarsi troppo dal valore proposto, in questo caso il valore è 35, in quanto si rischia di ottenere un errore per raggiungimento del massimo numero di nodi computabili, tale valore è funzione del tipo di licenza del software, in questo caso

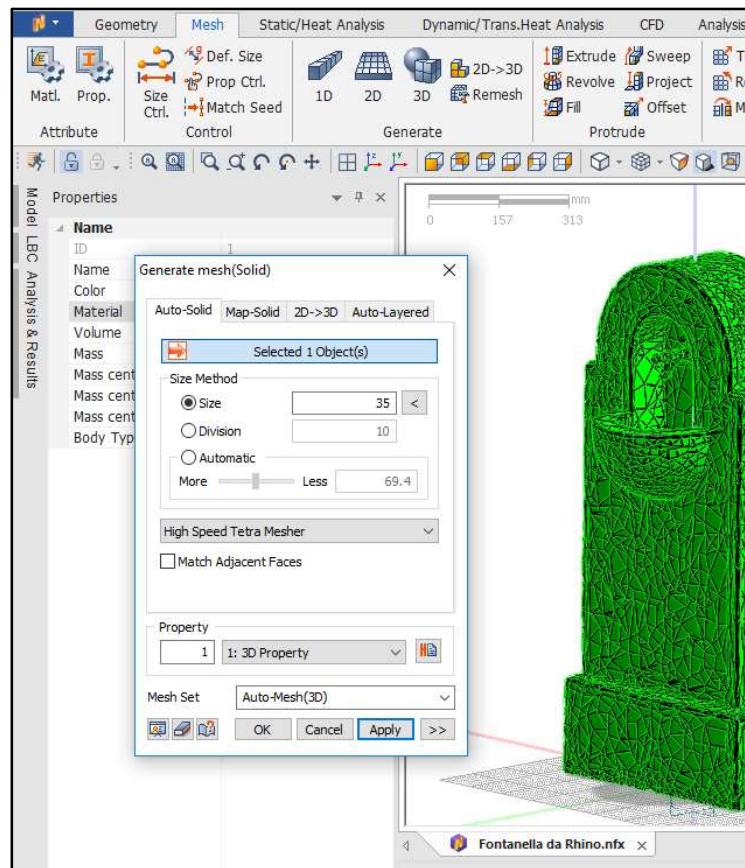


Figura 58: Scheda delle impostazioni della mesh 3D

100.000. In base alla dimensione dell’oggetto è possibile selezionare il *meshatore di default*, quello veloce “High Speed” o uno ibrido intermedio tra i primi due.

È stato quindi possibile passare all’assegnazione dei vincoli a terra, si è ipotizzato che la struttura fosse incastrata e dal menu “Static/Heat Analysis” si è selezionato il comando “Constraint”. Nella finestra che si apre alla voce “Name” è possibile inserire un nome alla condizione di vincolo, successivamente dal menu “Type” si è scelta la voce “Face” e si sono selezionate tutte le facce a contatto col terreno. In seguito si è selezionato “Fixed” per assegnare l’incastro e si è cliccato su “Apply”, Figura 59.

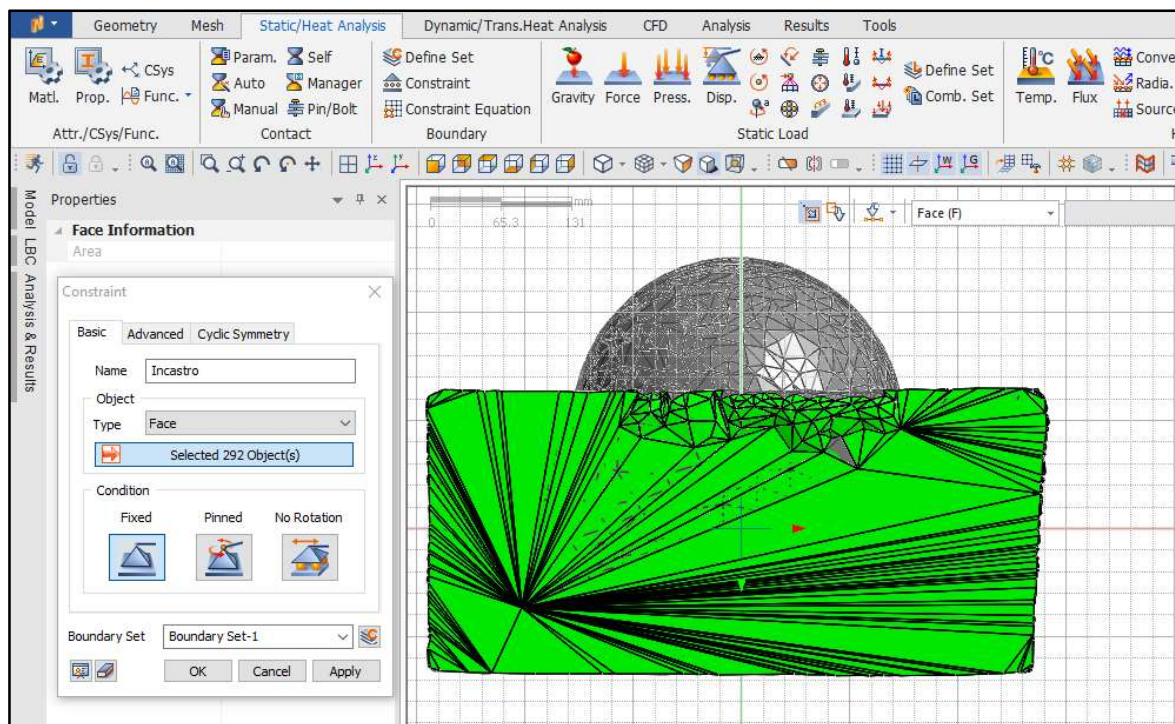


Figura 59: Selezione delle facce della mesh a contatto col terreno per vincolarle con un incastro, comando "Fixed"

Come sollecitazione di prova si è assegnato un carico uniformemente ripartito alla struttura agente sull'arco superiore e sulla vasca della fontana. Sempre dal menu "Static/Heat Analysis" si attiva il comando "Press." individuato da un'icona con quattro frecce normali ad un piano. La finestra che si apre è simile alla precedente, possiamo assegnare un nome al carico e selezionare le facce della mesh interessate. Essendo una pressione è necessario specificare la direzione, in questo caso si è posto (0,0,-1) cioè lungo l'asse z verso il basso, e si è digitato il modulo di 2 kN/m^2 confermandolo con "Apply", Figura 60.

Oltre a questo carico è possibile assegnare il peso proprio della struttura andando ad agire sul comando "Gravity". Generalmente il sistema assegna correttamente il carico gravitazionale e risulta sufficiente solo confermarlo con "Apply".

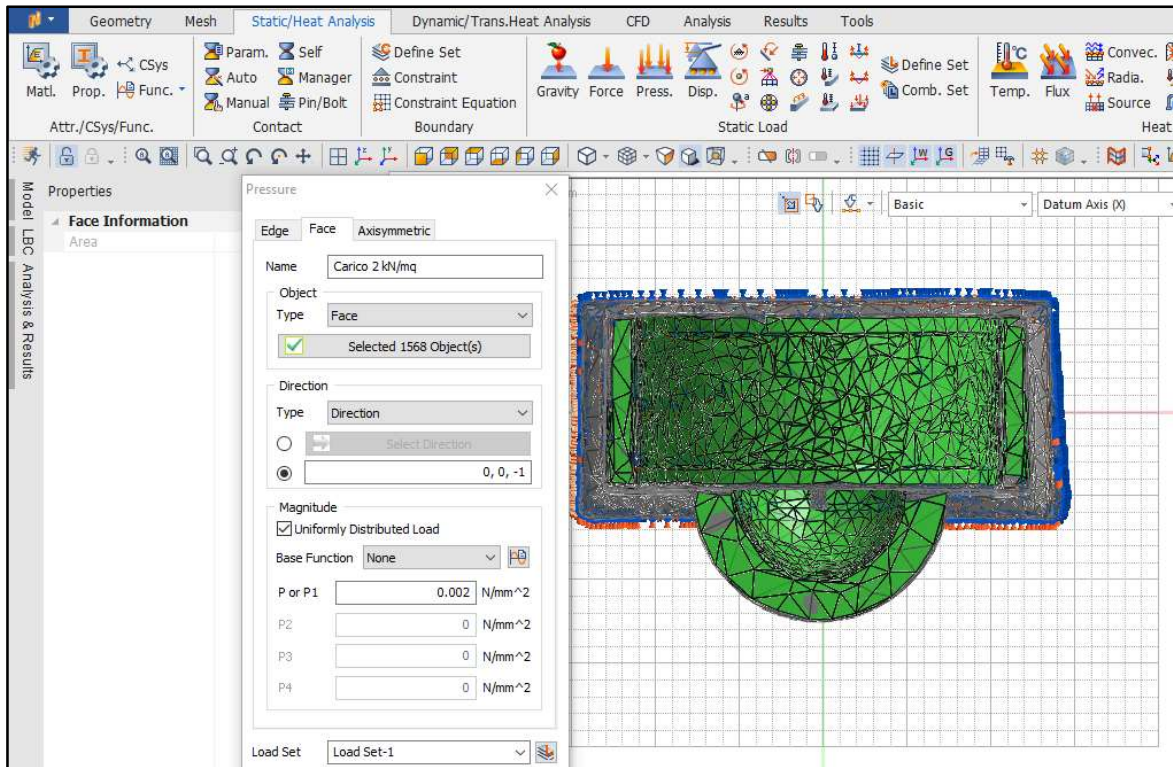


Figura 60: Finestra per l'inserimento di un carico di 2kN/mq sull'arco superiore e sulla vasca.

Ora dal menu “Analysis” si può accedere al comando “General” che apre una finestra nella quale è possibile selezionare il tipo di analisi da eseguire. Come prima prova si è selezionata un’analisi statica lineare, è stato necessario assegnare un nome proprio all’analisi confermandolo anche in questo caso con il tasto “Apply”, Figura 61.

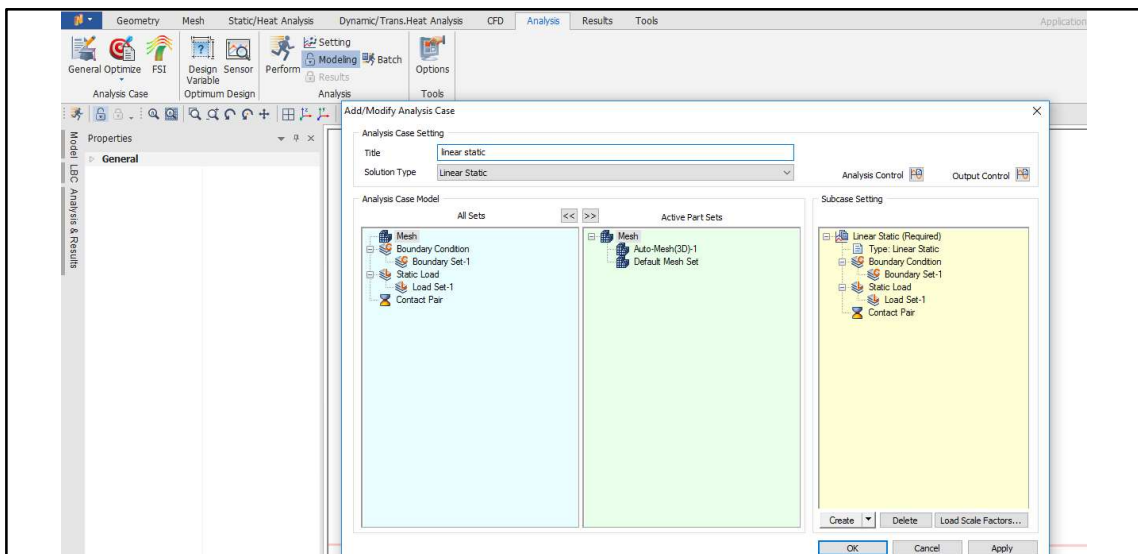


Figura 61: Finestra per la selezione del tipo di analisi.

A questo punto è possibile lanciare l'analisi cliccando sul comando "Perform". Terminata l'elaborazione selezionando la scheda "Analysis & Results" presente sul bordo sinistro dello schermo ed evidenziato in figura seguente in rosso, sarà possibile visualizzare tutti i risultati ottenuti, mentre agendo sul comando "Probe" evidenziato in Figura 62 in blu è possibile interrogare un nodo o un elemento per conoscere il risultato in quel punto.

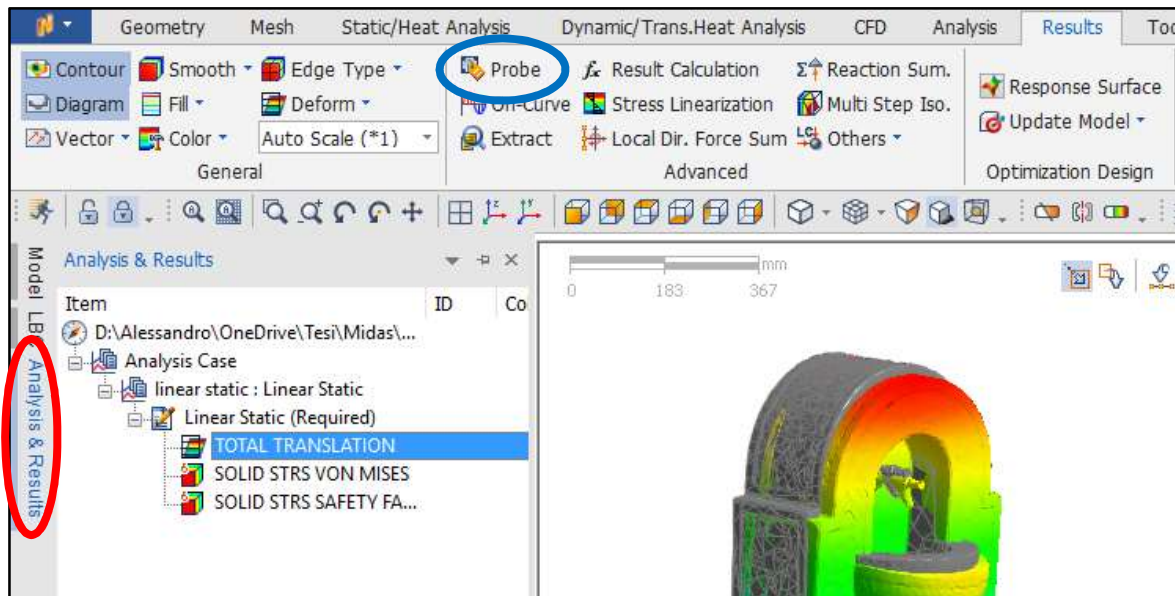


Figura 62: Selezione e visualizzazione dei risultati dell'analisi.

In definitiva possiamo schematizzare il metodo nelle seguenti punti:

- Creazione della nuvola di punti attraverso scansione laser o fotogrammetria
- Analisi della mesh: chiusura dei fori, eliminazione della autointersezioni, riduzione della densità
- Conversione in polisuperficie e esportazione in formato ACIS
- Importazione in ambiente FEM: impostazione dei materiali, delle proprietà, creazione mesh 3D, creazione vincoli e carichi
- Analisi

Si riporta di seguito, Figura 63, il diagramma di flusso che schematizza sinteticamente le operazioni principali della procedura.

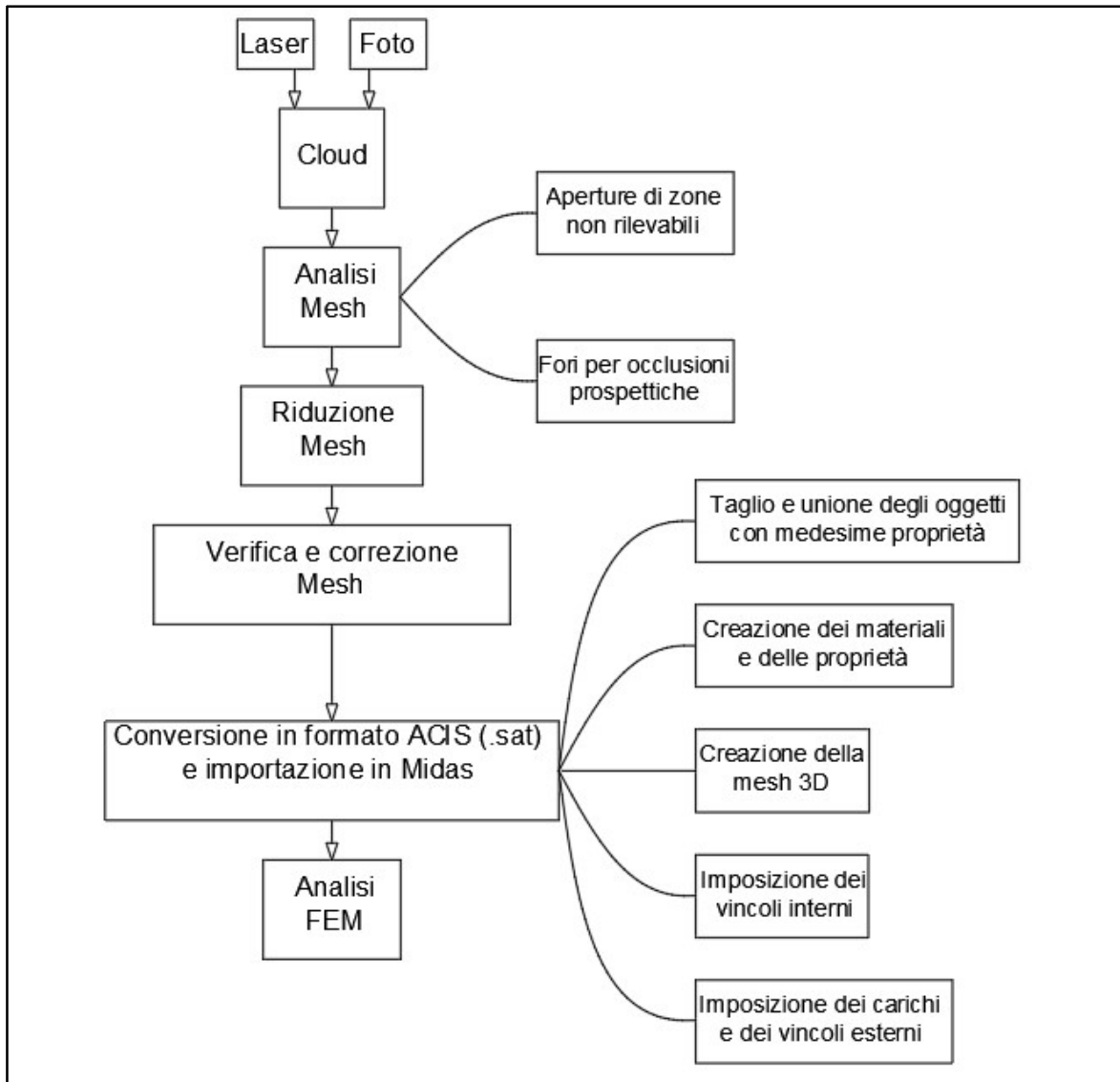


Figura 63: Flow chart della procedure CSF

5.1.2. Metodo 2: creazione del modello unico con un software BIM

Alcuni software BIM come Revit danno la possibilità di creare un modello tridimensionale partendo da nuvole di punti. Purtroppo in questo caso non è possibile utilizzare metodi automatici per ottenere il risultato visto in precedenza in quanto, come è già stato detto nel capitolo dedicato al BIM, questa metodologia lavora con oggetti parametrici in grado di interagire tra di loro che non possono essere creati automaticamente a causa dall'aleatorietà della posizione dei punti. È quindi necessario creare il modello “ricalcando” opportunamente i punti approssimando al meglio la nuvola.

Per cominciare dalla schermata principale di Revit è necessario creare un nuovo progetto come “modello strutturale”, Figura 64; questa scelta non è vincolante ma carica di default le “famiglie” necessarie al modello, come i vincoli esterni, che altrimenti dovranno essere caricate manualmente.

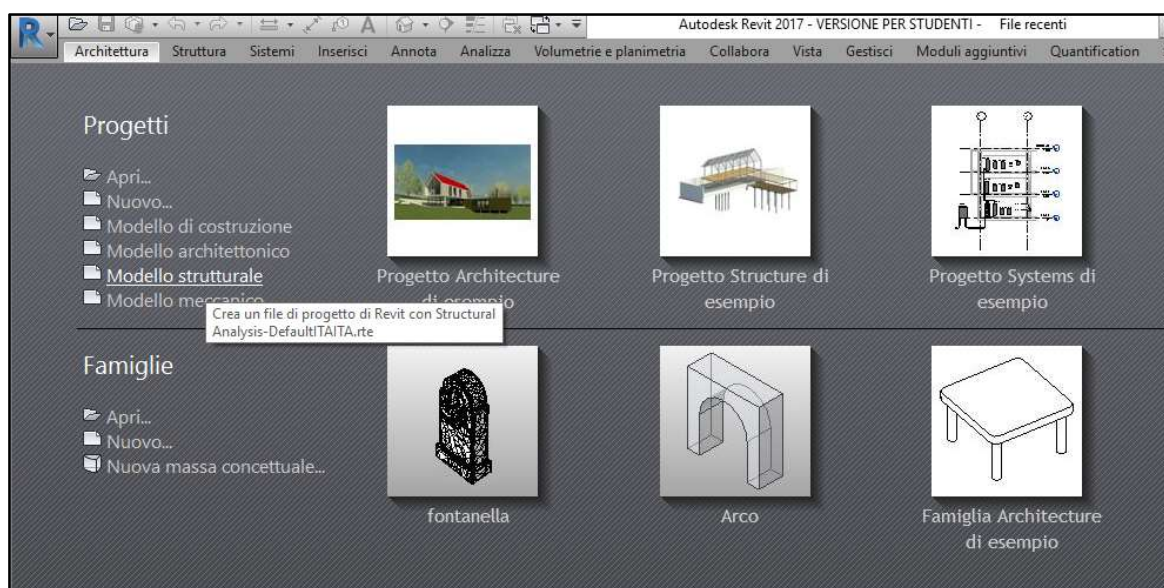


Figura 64: Schermata iniziale di Autodesk Revit

La fase successiva consiste nell'importare la nuvola di punti andando nel menu “*inserisci*” e selezionando il comando “*nuvola di punti*”, Figura 65. È possibile usare il formato “*res*” o “*rcp*” facilmente ottenibili, come è già stato mostrato, in fase di creazione della mesh in Recap.

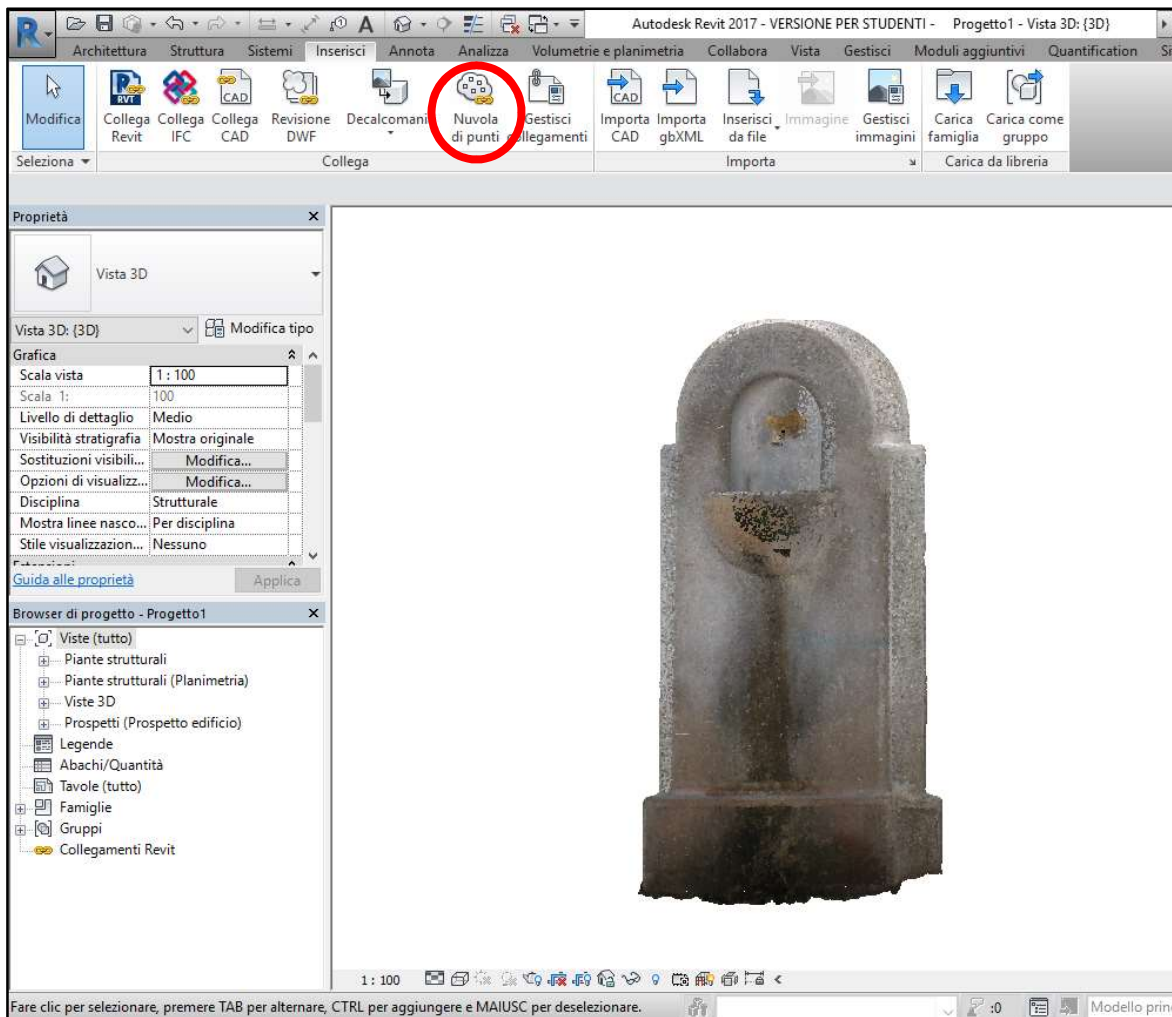


Figura 65: Importazione della nuvola di punti in formato rcv

A questo punto sarà possibile scalare la nuvola e ruotarla per orientarla correttamente col sistema di riferimento globale del software.

Per eseguire la rotazione è necessario cliccare sulla nuvola di punti in modo da accedere al menu “*Modifica | Nuvole di punti*” e selezionare il comando “*Ruota*”. Una volta attivato il comando è necessario cambiare il centro di rotazione che di default è assegnato nel centro della nuvola cliccando sul pulsante “*posiziona*” presente nella barra di comando. Spostando il mouse nelle zone di bordo il puntatore assumerà la forma di una X ad indicare che siamo sul punto di intersezione delle due perpendicolari, cliccando si conferma il nuovo punto di rotazione. Analogamente ci si sposta lungo uno dei due lati fino a raggiungere il secondo punto di intersezione dei bordi andando così ad individuare una retta che durante la rotazione tenderà automaticamente a posizionarsi sulla verticale. In questo caso l’angolo di rotazione è stato di 21.58°, Figura 66.

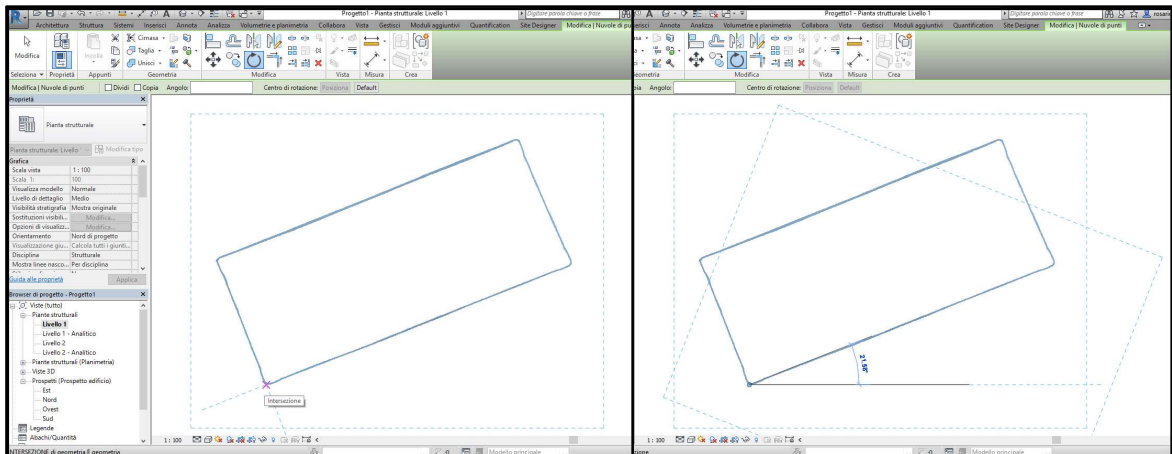


Figura 66: Rotazione della nuvola di punti in Revit. Grazie agli Osnap in prossimità delle intersezioni il puntatore assume la forma a X, mentre durante la rotazione verrà segnalato l'angolo che materializza la verticale, in questo caso 21.58°.

Per quanto riguarda la scala della nuvola di punti sarà necessario, dopo aver selezionato la nuvola, misurare col comando “Misura” una lunghezza nota, quindi selezionando il menù “modifica tipo” presente sulla sinistra del foglio di lavoro si andrà a leggere il valore di scala della nuvola. A questo punto con una semplice proporzione si otterrà facilmente il nuovo valore di scala da sostituire, Figura 67.

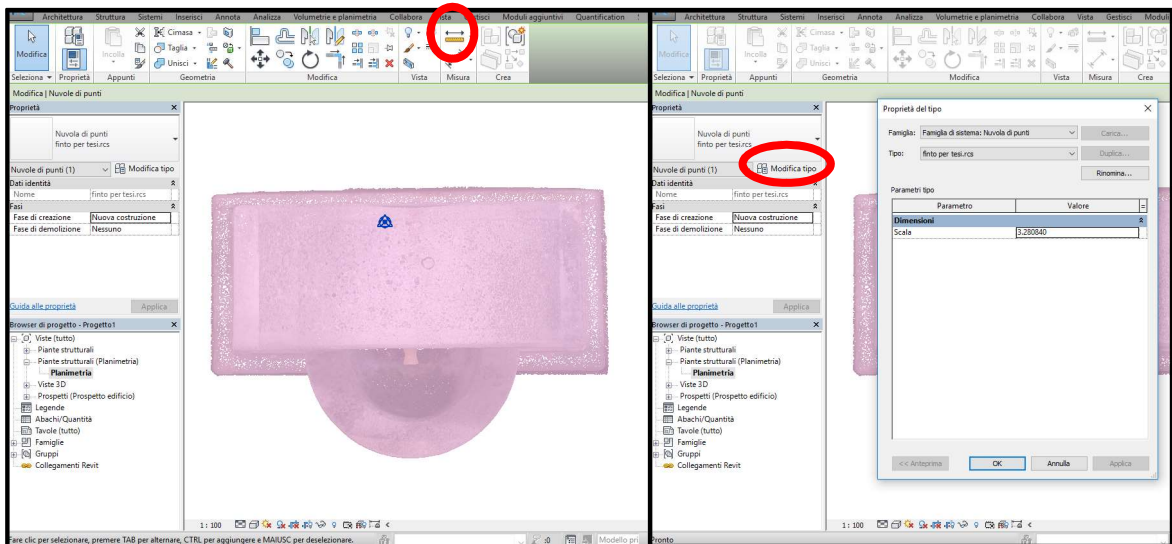


Figura 67: Comando "misura" rappresentato con un righello giallo, e modifica della scala dal menù "Modifica tipo"

Adesso è possibile iniziare a creare il modello tridimensionale dell'oggetto. Attivando le viste “*prospetti*” si va a selezionare la vista frontale per creare una linea di quota per ogni bordo dell'oggetto chiamate in Revit “livelli”, Figura 68. Ciascuna di queste linee crea un piano sul quale si potranno disegnare i singoli elementi della struttura che verranno estrusi fino al livello adiacente.

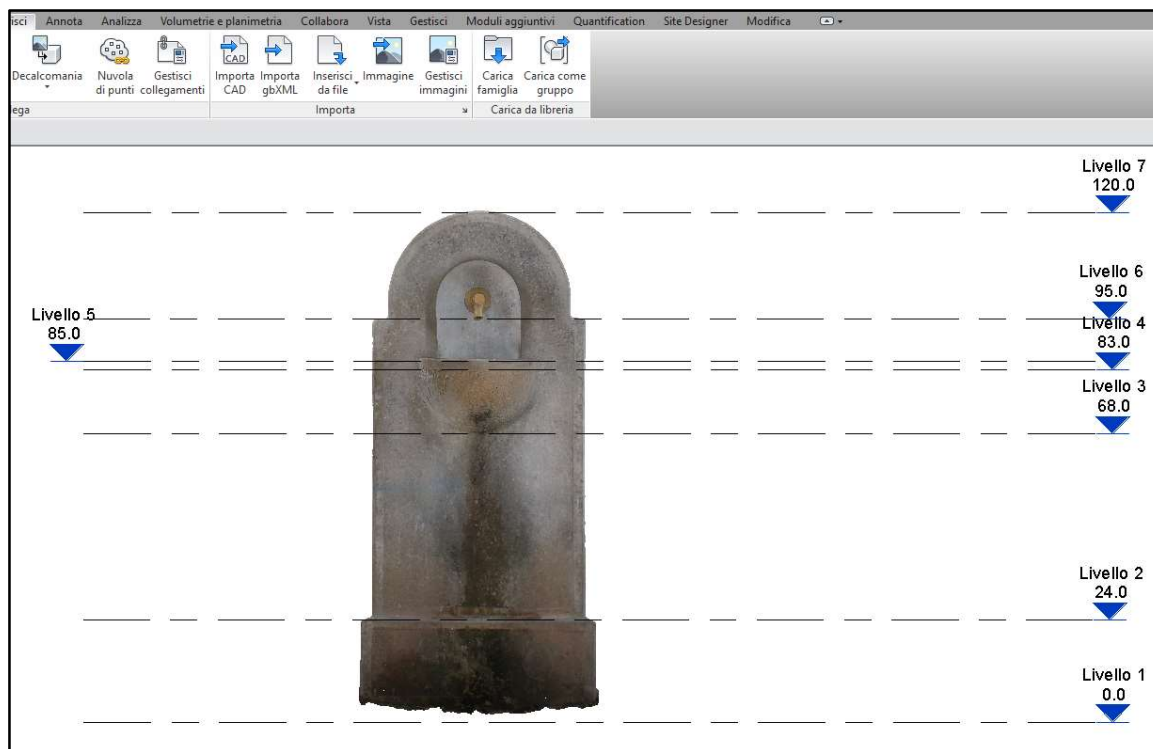


Figura 68: Creazione dei livelli in Revit

Dopo aver eventualmente corretto i piani di taglio è possibile andare a creare i vari oggetti che compongono la struttura. In questo caso per il livello 1 si creerà un muro di spessore 25 cm e lunghezza 55 cm. L'altezza di 24 cm può essere specificata a mano oppure può essere modificata nei prospetti trascinandola col mouse fino a collegarsi col livello desiderato, in questo caso il secondo.

Dal menu “*architettura*” si sceglie quindi “*muro strutturale*” entrando nel menu “*modifica tipo*” selezionando il pulsante “*duplica*” si potrà creare un nuovo muro dello spessore desiderato, Figura 69.

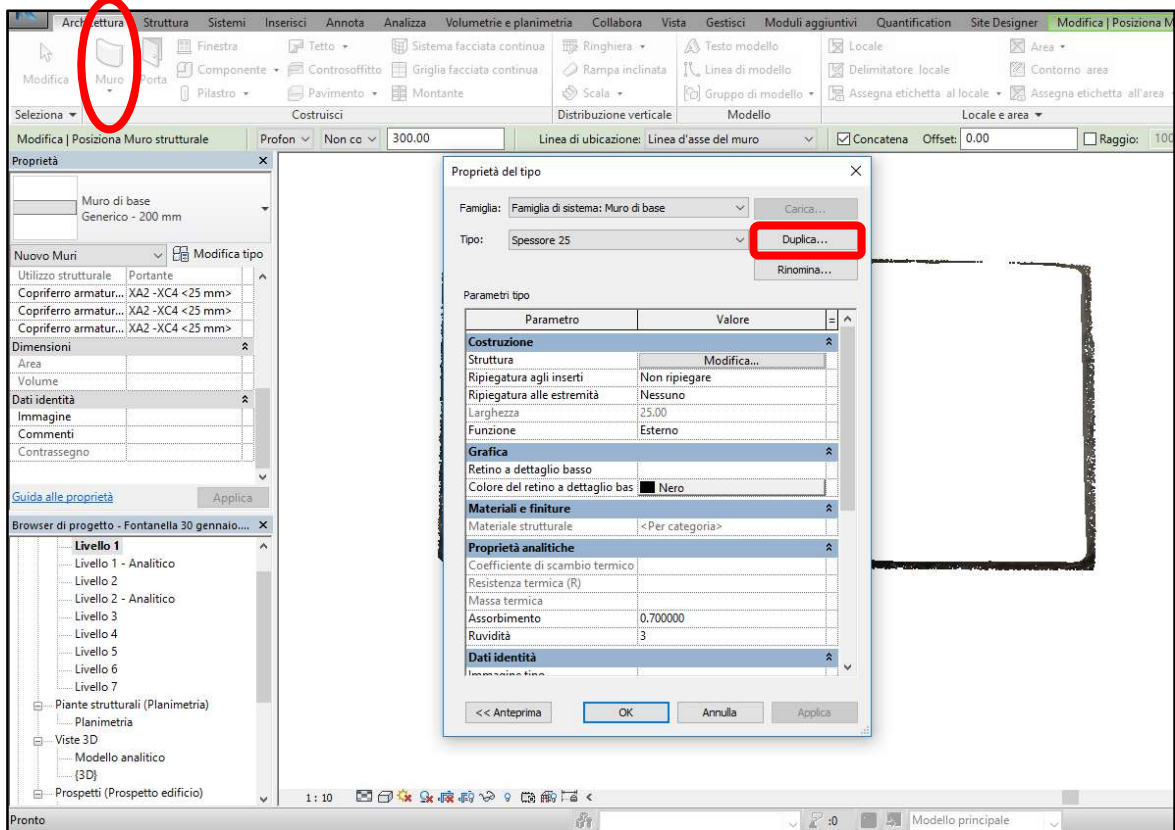


Figura 69: Creazione del muro strutturale di spessore 25 cm. Nell'ovale il comando Muro, nel rettangolo il comando Duplica

Si procede analogamente per tutte le altre sezioni fino a giungere alla realizzazione dell'arco superiore. Per quest'ultimo si realizza un muro rettangolare come i precedenti e si andrà a modificare il bordo superiore entrando nel menu "modifica muri" e selezionando il comando "modifica profilo". Con gli strumenti di disegno si va a ad approssimare il bordo alla nuvola di punti, in questo caso è stato usato un semi ellisse. L'ultimo passo prima di confermare è di eliminare lati del bordo rettangolare non più utili, Figura 70.

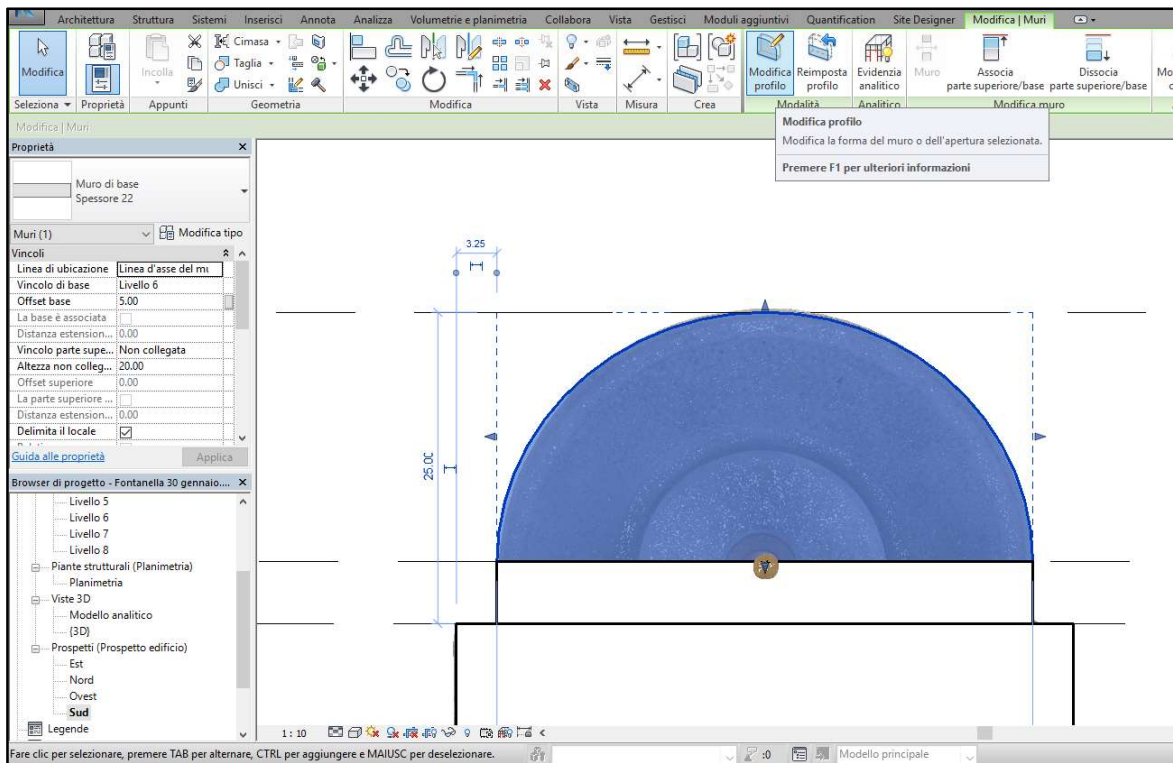


Figura 70: Creazione dell'arco superiore modificando i bordi del muro rettangolare.

Il risultato che si ottiene, mostrato nella Figura 71, è il corpo della fontanella ancora privo della vasca e della rientranza nella quale è alloggiato il rubinetto.

Per creare le cavità è necessario entrare nel menu “architettura” e selezionare “componente” e infine “modello locale”; dalla finestra che si apre si seleziona la famiglia “muri” e si assegna un nome, ad esempio “solido di sottrazione”.

A questo punto dal menu specifico che compare sarà necessario selezionare “vuoto” e infine “estrusione su percorso”. Selezionato il livello in cui è presente il foro si specifica la direzione dell'estrusione fino a raggiungere la nuvola di punti, Figura 72.

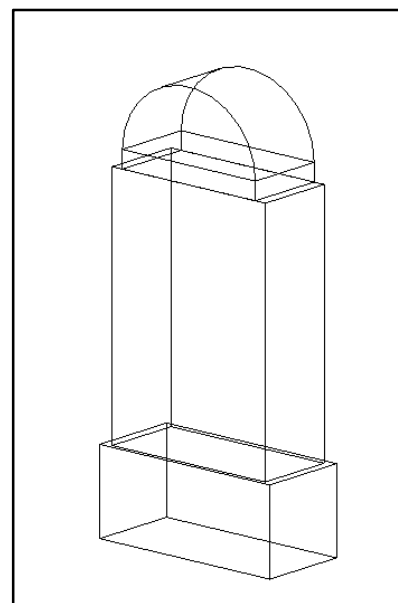


Figura 71: Modello 3D preliminare al quale andranno aggiunte le cavità e la vasca.

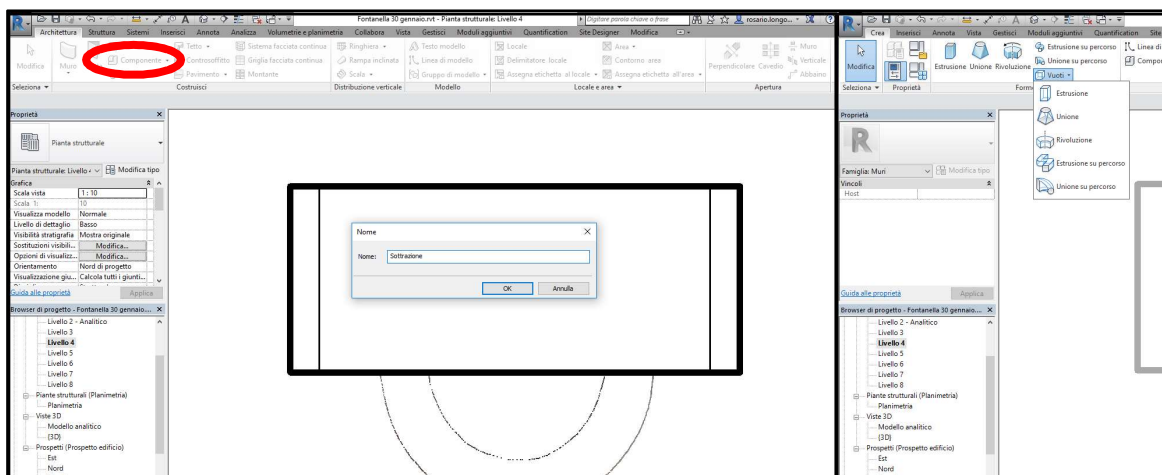


Figura 72: Realizzazione di un vuoto in un solido con Revit. A sinistra il comando "componente" del menu "Architettura", a destra la selezione dell'estrusione desiderata.

Una volta selezionata la direzione si può creare il profilo dell'estrusione, per farlo basta selezionare "modifica profilo", a questo punto il sistema chiederà su quale dei due prospetti si intende lavorare (fronte o retro). Utilizzando i comandi del menu "disegna" del tutto analoghi a quelli di un CAD 2D si realizzerà un solido che attraverso il comando "Taglia" verrà sottratto dal volume iniziale, Figura 73.

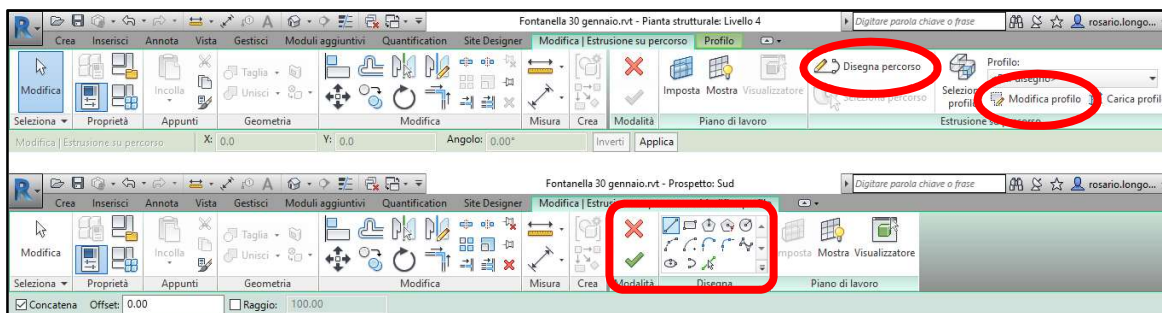


Figura 73: Sopra il comando "Disegna percorso" e "Modifica profilo", sotto i comandi del menu "Disegna"

Dopo aver usato il comando "Unisci" sulle porzioni di struttura che hanno le stesse caratteristiche si ottiene il risultato di Figura 74:

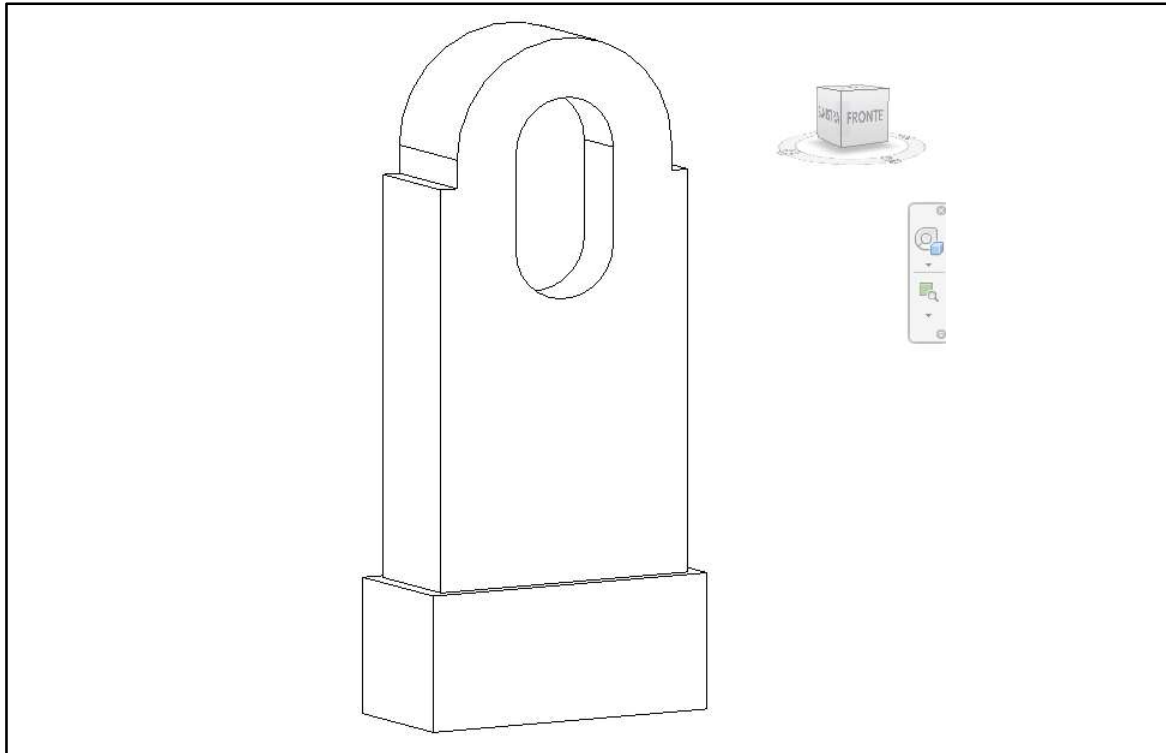


Figura 74: Modello 3D con la cavità

Analogamente è possibile realizzare la vasca della fontana. Si entra nuovamente nel menu “Architettura”, comando “Componete” e “Modello locale”, si seleziona nuovamente la famiglia “Muri” ma questa volta si va a realizzare un solido di rivoluzione, Figura 75.

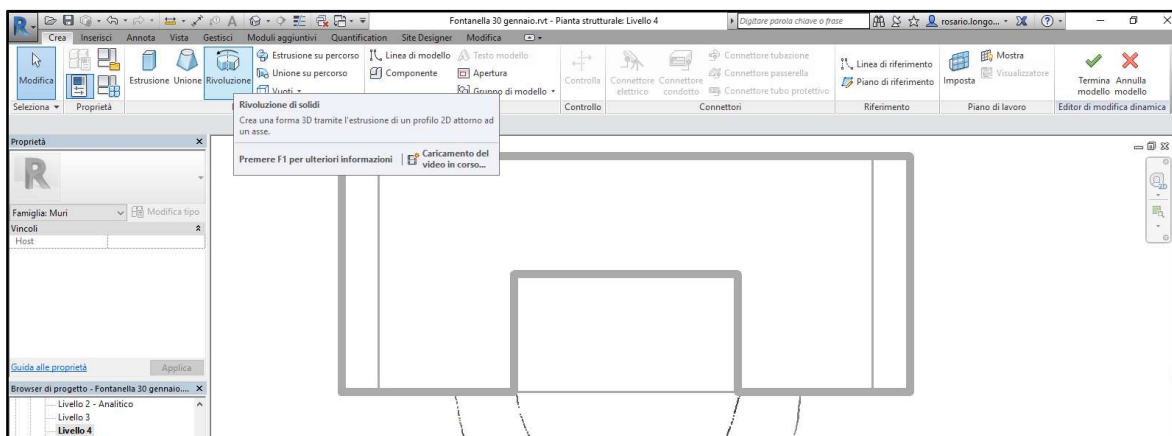


Figura 75: Creazione di un solido di rotazione per realizzare la vasca della fontana

Una volta selezionato il comando si disegna la planimetria della vasca imponendo l'asse e angolo di rotazione che in questo caso risulta essere di 90°. A questo punto il modello è completo e il risultato ottenuto è visibile in Figura 76:

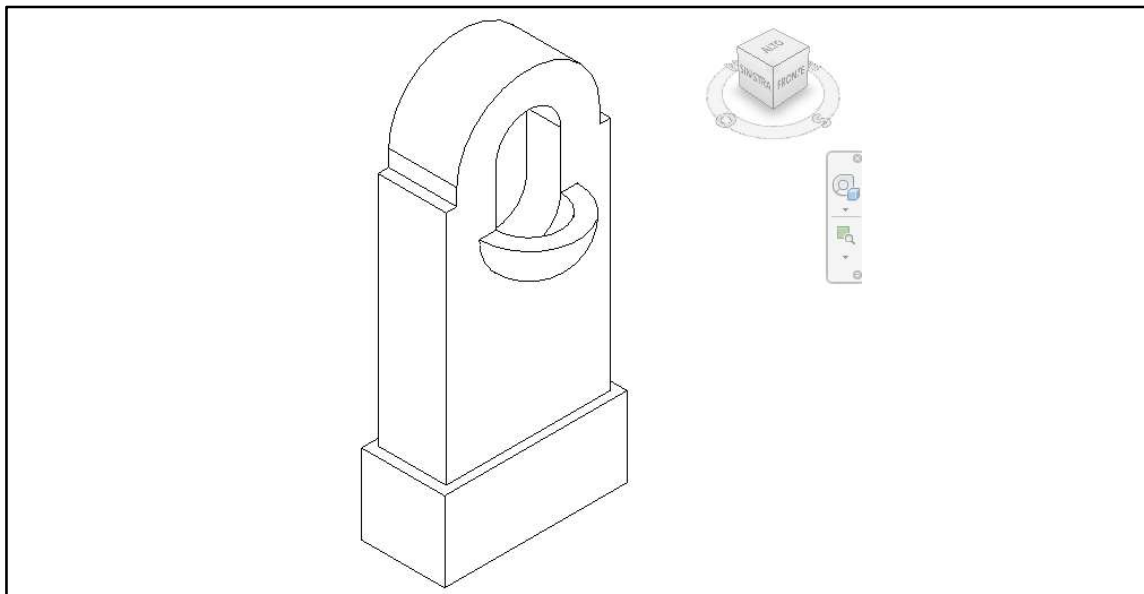


Figura 76: Risultato della modellizzazione con Revit

Adesso è possibile esportare il modello in Midas NFX, per farlo è sufficiente entrare nel menu “file”, cliccare su “esporta” e infine scegliere il formato ACIS, Figura 77.

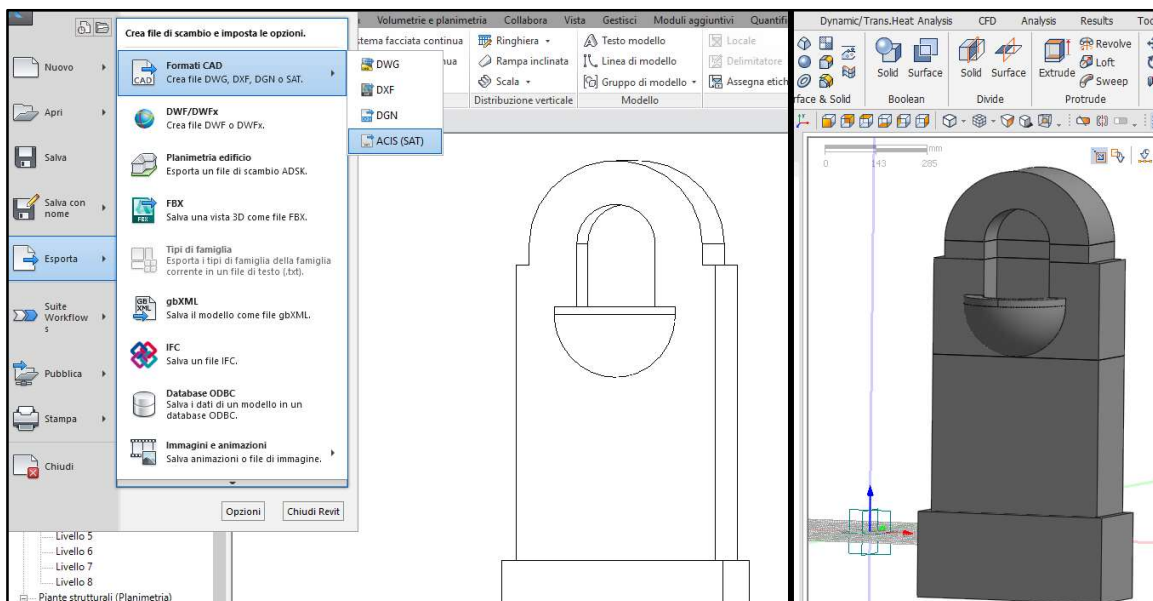


Figura 77: A sinistra i comandi di Revit per esportare il modello, a destra il modello importato in Midas NFX

Si osserva che il modello è stato importato correttamente ma Midas NFX interpreta la struttura non come unico corpo ma come fosse composta da differenti elementi adiacenti. Visto che in questo metodo ci si vuole ricondurre ad un oggetto unico per poter confrontare i risultati col metodo visto nel paragrafo precedente si andrà a selezionare il comando “*Solid*” nel menu “*Geometry*” e dalla tabella “*fuse*” si selezioneranno tutti gli elementi per fonderli insieme, Figura 78.

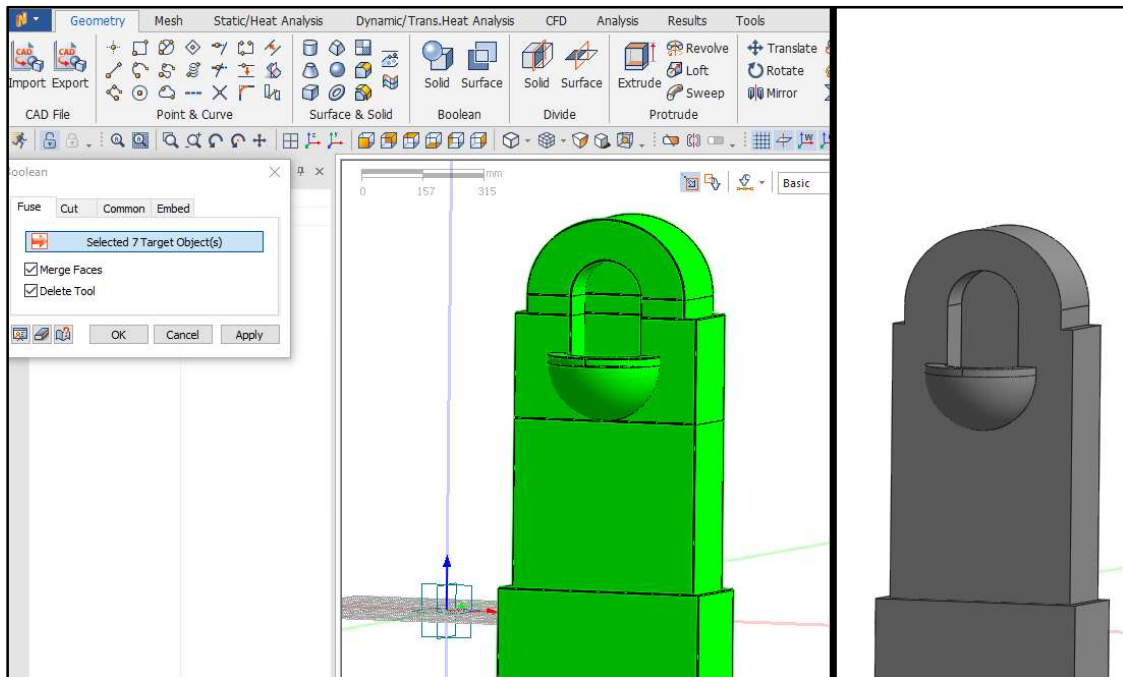


Figura 78: Utilizzo del comando “solid” in Midas NFX, a destra il risultato ottenuto

Da questo punto in poi il procedimento è lo stesso visto nel primo metodo, si crea la mesh 3D, si va ad assegnare il materiale con le sue proprietà, i carichi e i vincoli esterni e infine dopo aver creato l’“*Analysis case*” si lancia il solutore ottenendo il risultato di Figura 79:

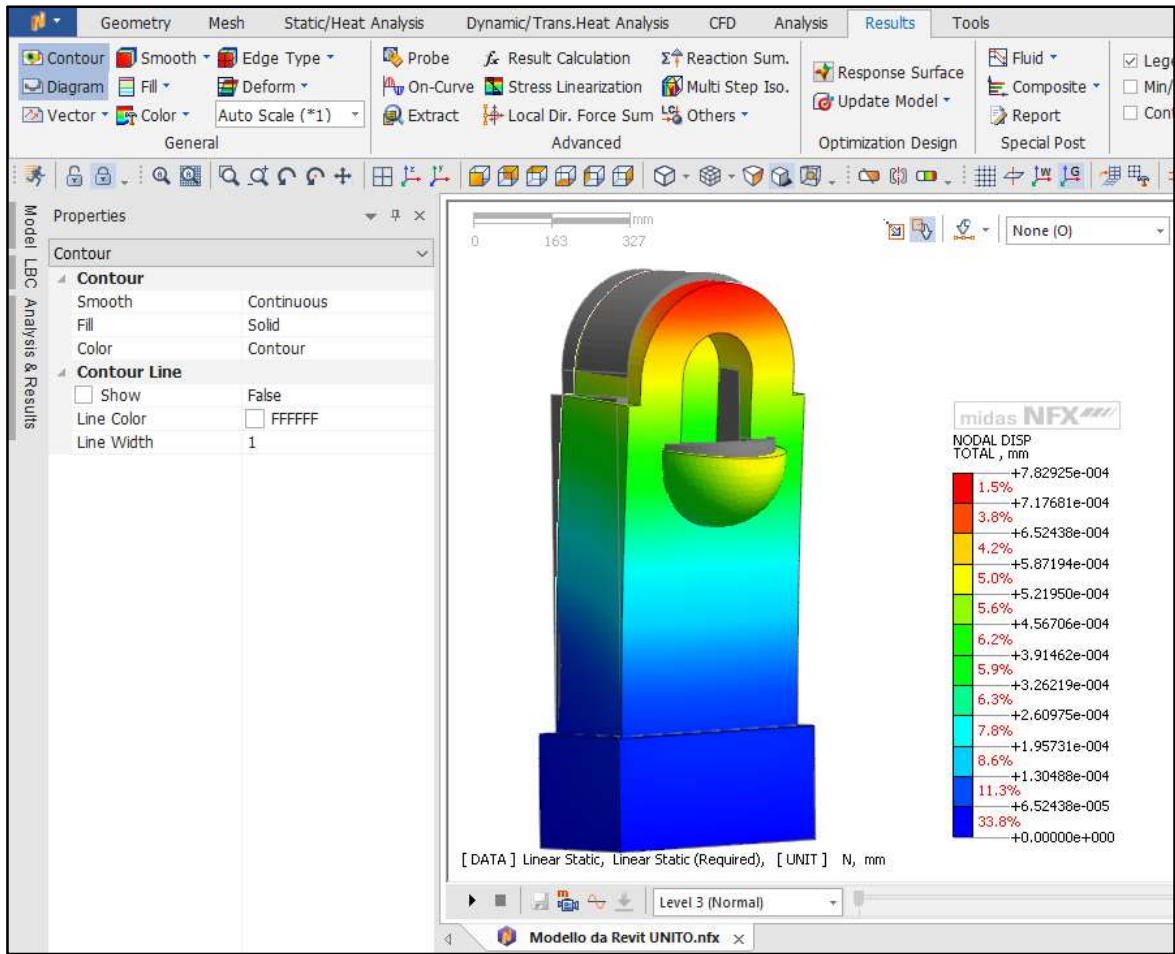


Figura 79: Risultato dell'elaborazione del modello costituito da un unico elemento

5.1.3. Metodo 3: creazione del modello ad elementi separati con un software BIM

Nell'ottica di dover lavorare con strutture composte da elementi differenti si è pensato di sostituire il passaggio di unione visto nel punto precedente andando ad aggiungere dei vincoli interni che mantengano la congruenza degli spostamenti e la diffusione dei carichi. Per fare questo si usa il comando "Auto contact" dal menu "Static/Heat Analysis" e si selezionano tutti gli elementi che devono avere spostamenti congruenti, Figura 80. Infine come è stato visto nei paragrafi precedenti si impongono i vincoli a terra e i carichi sull'arco e sulla vasca, si crea l'"Analysis case" desiderato e si lancia il solutore, Figura 81.

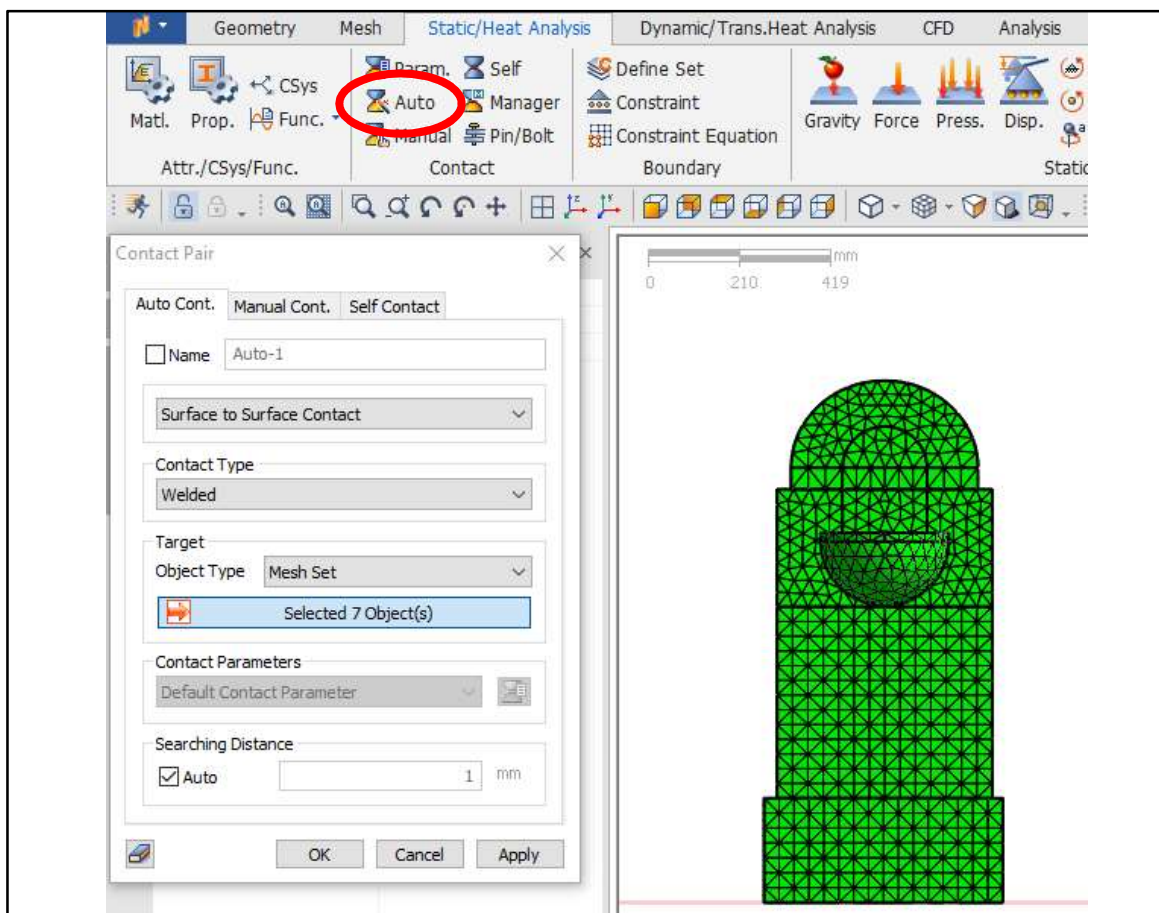


Figura 80: Comando "Auto Contact" utilizzato per imporre la congruenza degli spostamenti dei diversi elementi

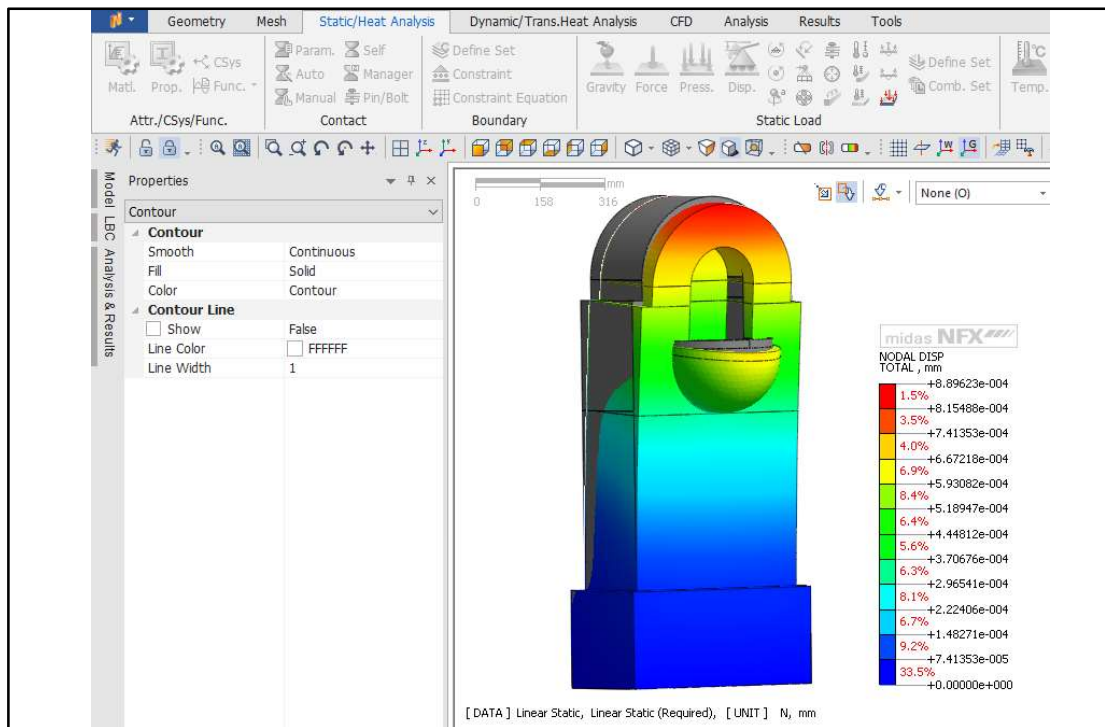


Figura 81: Risultato dell'elaborazione del modello costituito da più elementi internamente vincolati

In definitiva possiamo schematizzare il metodo nelle seguenti punti:

- Creazione della nuvola di punti attraverso scansione laser o fotogrammetria
- Creazione del modello BIM
- Esportazione in formato ACIS
- Importazione in ambiente FEM: impostazione dei materiali, delle proprietà, creazione mesh 3D, creazione vincoli e carichi
- Analisi

Si riporta in Figura 82 il diagramma di flusso che schematizza sinteticamente le operazioni principali della procedura.

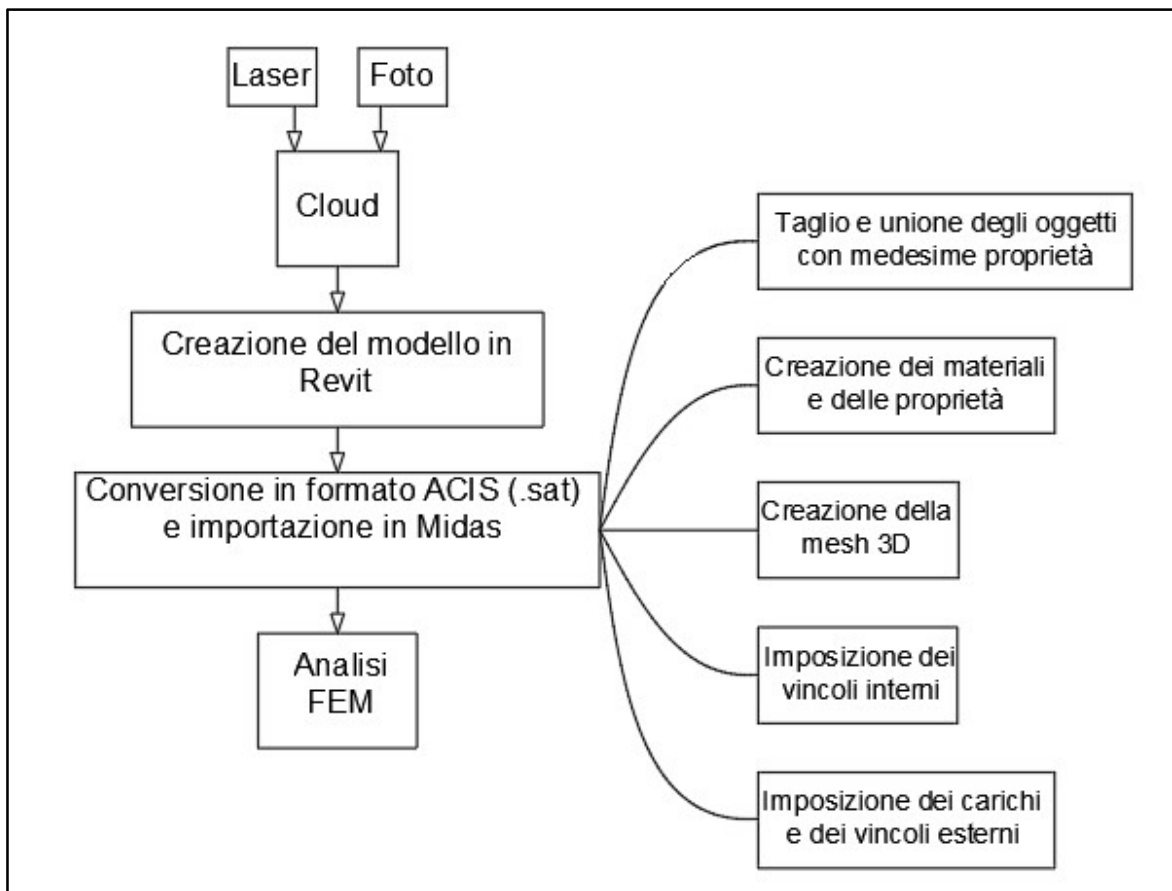


Figura 82: Flow chart della procedura BIM

5.2. Fase 2: studio dell'Arco d'Augusto di Rimini

In questa fase si è voluto validare i risultati dei metodi descritti nel paragrafo precedente: per fare ciò sono state effettuate delle analisi usando le stesse condizioni considerate in altri lavori di laurea in modo da poter confrontare i risultati ottenuti. Nello specifico si è fatto riferimento ai risultati ottenuti da Marco Succi [8] e da Maurizio Serpieri [9].

La tesi di Serpieri può essere suddivisa in tre parti, la prima in cui si riassume tutto ciò che dell'Arco di Augusto è noto, in cui sono state riportate approfondite ricerche storiche sulle origini e sui restauri che hanno interessato il manufatto; la seconda parte riguardante lo studio fotogrammetrico non convenzionale realizzato con una fotocamera amatoriale, una cordella metrica, filo a piombo, target adesivi e il software *Photomodeler* per l'elaborazione e la

restituzione dei dati e infine la terza parte dove attraverso il software FEM Straus ha eseguito delle analisi strutturali realizzando dei modelli mono e bidimensionali in cui ha valutato il comportamento sotto peso proprio e l'analisi modale.

Succi nel suo elaborato si è prefissato l'obiettivo di studiare il comportamento statico e dinamico dell'Arco di Augusto partendo da una nuvola di punti e creando il modello tridimensionale della struttura con la procedura *Cloud2Fem* [10][11][12][13]. Questa procedura, ideata e realizzata dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna (DICAM), permette di generare un modello composto da pixel tridimensionali detti *voxel* grazie alla composizione di *slices* orizzontali e verticali. La fase di "*slicing*" consiste nel suddividere la nuvola di punti in sezioni piane consecutive Δz caratterizzate da una coordinata progressiva lungo la direzione z; successivamente tutti i punti appartenenti all'intervallo Δz vengono proiettati sul piano medio della sezione. E' possibile operare indipendentemente su ogni slice usando software dedicati per la gestione di dati georeferenziati (ad esempio software GIS).

Le sezioni vengono realizzate a passo regolare al diminuire del quale aumenta il dettaglio della geometria ma anche l'onere computazionale. Il risultato è una successione di *layers* che contengono dati bidimensionali (x, y) e una costante z che vengono impilati generando i *voxel*. Si ottiene quindi una geometria tridimensionale che viene convertita automaticamente in un modello a elementi finiti con elementi esaedrici a otto nodi. In Figura 83 si riporta diagramma di flusso della procedura Cloud2Fem mentre in Figura 84 alcuni esempi di *slice* orizzontali e verticali e *slice* orizzontali ottenuta con il software Q-Gis usate per la costruzione del modello FEM.

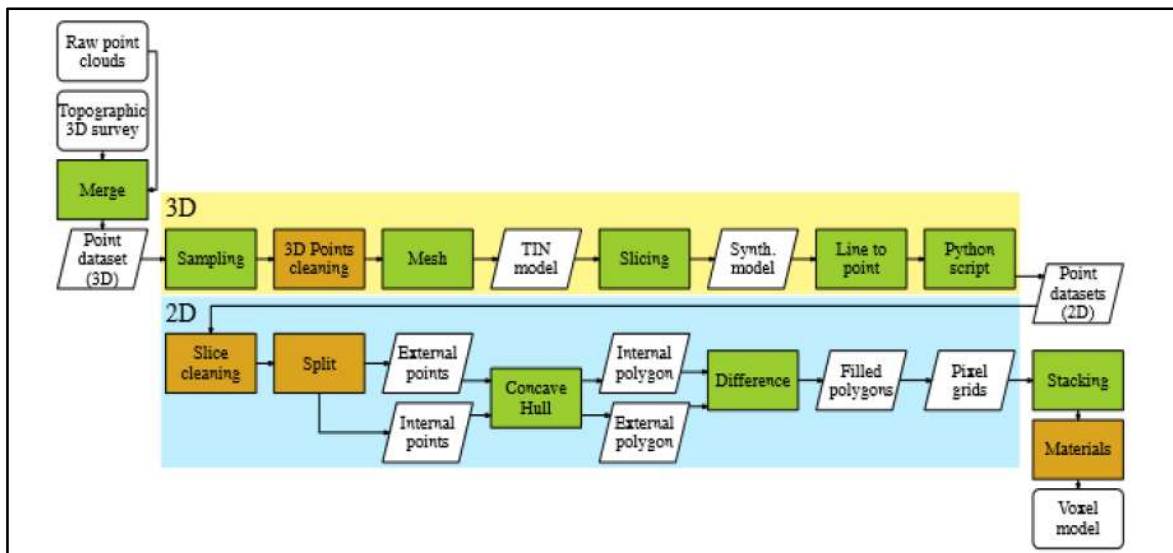


Figura 83: flowchart della procedura CLOUD2FEM. Le caselle in verde indicano le procedure automatiche, quelle gialle le procedure semi-automatiche (Castellazzi et al., 2015 [13])

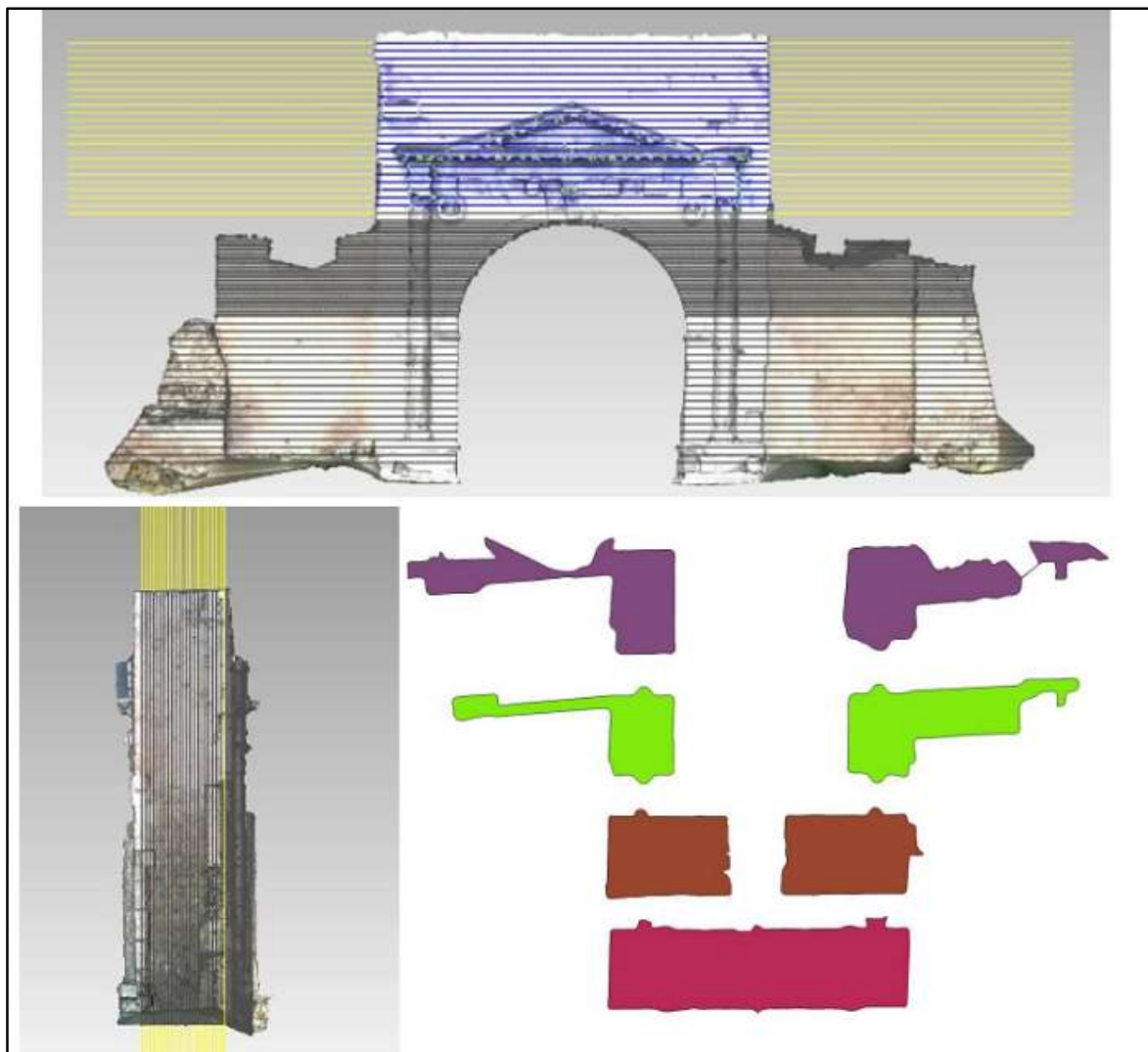


Figura 84: Esempi di slices orizzontali (sopra), verticali (sotto a sinistra), alcune slices orizzontali ottenute con il software Q-Gis e utilizzate per la costruzione del modello FEM

I risultati ottenuti con questo metodo sono stati confrontati con il modello tradizionale CAD realizzato con il software *Revit Architecture* in base alle misure effettuate dal DICAM–Laboratorio di topografia e usate da Maurizio Serpieri per la sua tesi.

5.2.1. Creazione del modello dalla nuvola di punti (Metodo 1)

La realizzazione del modello è stata ottenuta tramite il software Autodesk Recap utilizzando le immagini realizzate durante il rilievo da parte del DICAM–Laboratorio di topografia e usate da Maurizio Serpieri per la sua tesi di laurea “Rilevamento fotogrammetrico digitale non convenzionale ed analisi strutturale agli elementi finiti dell’Arco d’Augusto di Rimini” [9].

Sono state utilizzate 99 delle 104 foto caricate, è probabile che le altre cinque che non sono state accettate dal software non avessero una percentuale di sovrapposizione adatta all’algoritmo di *matching*.

Per l’acquisizione delle immagini è stata usata una fotocamera digitale amatoriale Nikon Coolpix 5400 da 5 Mpixel i cui parametri di calibrazione sono stati stimati tramite il software *PhotoModeler Pro 5* ottenendo i parametri riportati in Tabella 3:

Distanza focale:	5.0563 mm
Dimensione formato:	W: 6.0023 mm; H: 4.5000 mm
Coordinate del Punto Principale:	2.9982; 2.2481
Distorsione lente:	K1: $5.941 \cdot 10^{-3}$; P1: $8.483 \cdot 10^{-5}$ K2: $-1.680 \cdot 10^{-4}$; P2: $2.231 \cdot 10^{-4}$ K3: 0.00
Dimensione immagine:	2592x1944

Tabella 3: Parametri della fotocamera utilizzata per rilevare l’Arco di Augusto

Dopo aver realizzato il modello con Recap è stato importato in ReMake dove è stato possibile pulire la mesh e chiudere le aperture. In questo caso oltre all’aperura alla base già vista nello studio della fontanella, si è dovuto chiudere la parte superiore dell’arco che non è stata catturata da nessuna fotografia. Per lo stesso motivo si sono eliminate le merlature in sommità, infatti la mancanza di un’adeguata scansione dall’alto ha portato il software a costruirle con una mesh praticamente bidimensionale, poco utile per gli scopi di questa tesi.

Il modello è stato esportato successivamente in Rhinoceros5 dove la mesh è stata ridotta del 98% per consentire l'importazione in Midas NFX. Durante la fase di verifica delle mesh è stato osservato che la procedura automatica aveva creato alcuni elementi autointersecanti; questo fenomeno è da correggere il più possibile in quanto durante la fase di meshatura tridimensionale in Midas gli elementi autointersecanti creano delle compenetrazioni che richiedono di interrompere il processo. Purtroppo Rhinoceros5 individua la presenza delle autointersezioni ma non esiste un comando che le evidenzi in automatico richiedendo una paziente ricerca manuale. Per accelerare tale operazione si è importata ugualmente la mesh in Midas in quanto questo programma oltre a restituire l'errore di meshatura segnala con un pallino viola la zona in cui è stato riscontrato il problema consentendo una più mirata ricerca in Rhinoceros.

Una volta importata correttamente la mesh in Midas NFX è stato necessario suddividerla in base alla posizione dei singoli materiali. Per farlo sono stati creati dei piani attraverso l'estrusione di linee precedentemente disegnate in Rhinoceros5. Il comando *Divide Solid* è tornato particolarmente utile per questo scopo in quanto ha la grande potenzialità, oltre di dividere gli elementi, di chiudere automaticamente la sezione ottenendo quindi due elementi chiusi in cui è possibile costruire una mesh 3D. Necessariamente i piani di sezione hanno separato anche zone a cui attribuire lo stesso materiale che quindi sono state riunite col con l'opzione *fuse* del comando *Boolean Solid*, Figura 85.

Un limite di Midas NFX è stato di non riuscire a utilizzare una superficie curva per tagliare il corpo centrale, si è proceduto quindi ad approssimare il bordo interno dell'arco, costituito in Pietra di Nabresina Roman Stone, con una polilinea costituita da otto segmenti. Per lo spessore dell'arco si è fatto riferimento alla tesi di Maurizio Serpieri ed è stato assunto di 170 cm mentre per la muratura sono stati assunti 70 cm di spessore e, trattandosi di una muratura a sacco, alla parte interna rimanete è stato assegnato un materiale di riempimento di caratteristiche meccaniche minori.

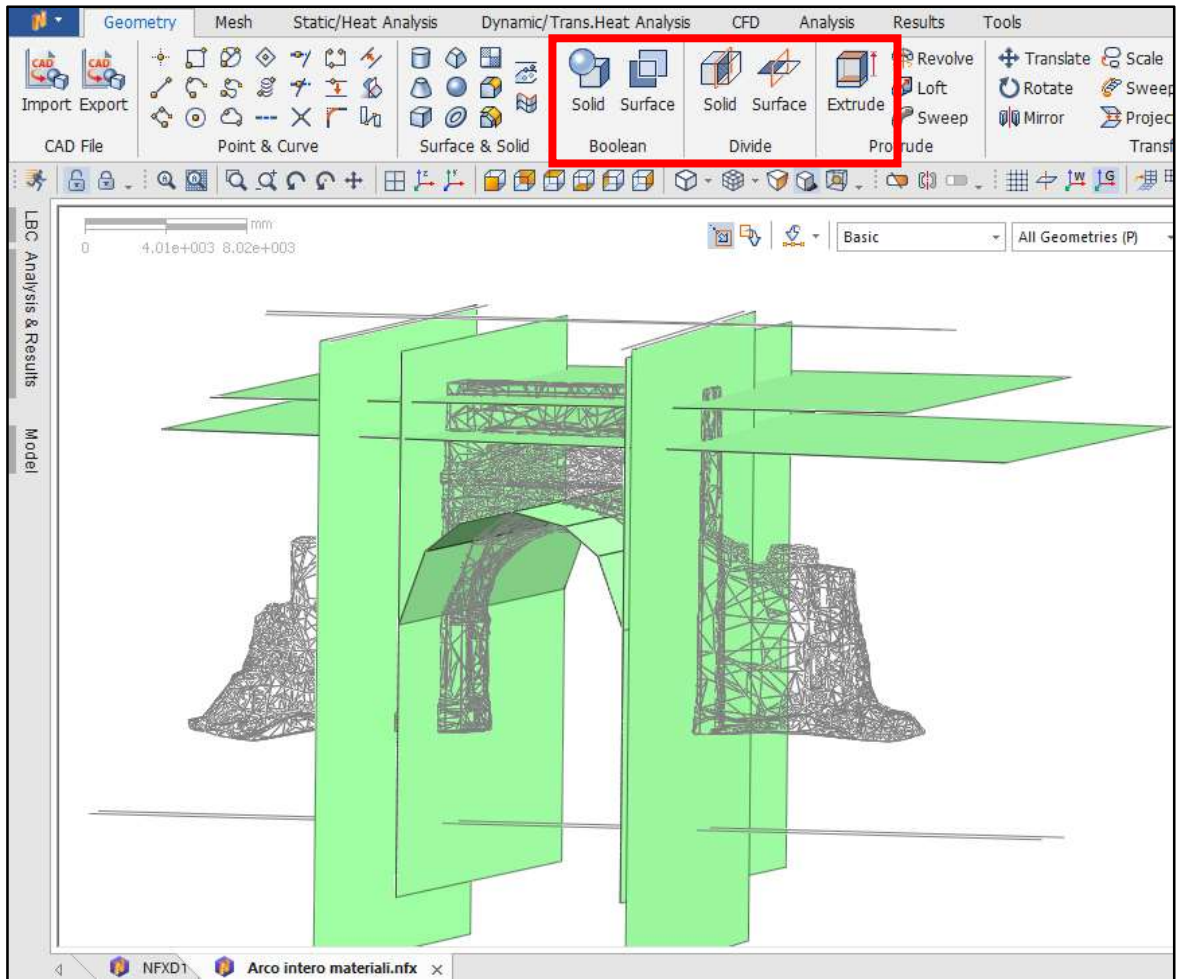


Figura 85: Creazioni dei piani di taglio in Midas NFX. Nel riquadro rosso sono visibili i comandi Extrude, per estrarre le linee importate da Rhinoceros5, Divide Solid, per spezzare l'oggetto e Boolean Solid per fondere le parti costituite dallo stesso materiale

Volendo confrontare i risultati con quelli ottenuti da Marco Succi che nella sua tesi ha utilizzato una procedura differente [8], si sono assunti per i materiali le medesime caratteristiche riportate in Tabella 4:

Materiale	E [Mpa]	v	ρ [kg/m ³]	Compressione [Mpa]	Trazione [Mpa]
Muratura	1500	0,2	1800	2	0,12
Pietra d'Istria	3000	0,15	2644	4	0,40
Riempimento	1200	0,25	2300	1	0,60

Tabella 4: Proprietà meccaniche assunte per l'Arco di Augusto

I materiali e le rispettive proprietà sono state assegnate dal menu *mesh* come è stato spiegato nel precedente paragrafo. Nella Figura 86 è riportato l'arco senza il rivestimento lapideo per mostrare la modellazione del materiale di riempimento, mentre in Figura 87 si hanno i due prospetti della struttura.



Figura 86: Vista del materiale di riempimento

A questo punto si sono confrontati il peso e il volume di questo modello con i rispettivi valori del modello *CAD-based* e *CLOUD2FEM-based* realizzati da Succi, Tabella 5.

Modello	Massa [Kg]	Volume [m ³]
CAD (Succi)	1981119	886.73
CLOUD2FEM (Succi)	2074448	924.40
CSF (Longo)	2186912	985.95

Tabella 5: Confronto dei pesi e dei volumi tra i modelli realizzati con differenti metodologie



Figura 87: Prospetti dell'Arco di Augusto

Dopo aver assegnato il vincolo di incastro sia ai piedi dell'arco che al muro limitrofo, si è proceduto ad un'analisi lineare sotto il peso proprio della

struttura. Gli spostamenti ottenuti sono molto simili a quelli del modello Cloud2FEM ottenuti da Succi con un abbassamento della chiave di volta di circa 3,9 mm a fronte di 3,7 mm con una differenza percentuale del 5.13%. Nelle due immagini di Figura 88 sono messi a confronto gli andamenti delle deformazioni per i modelli CSF, rispettivamente sopra, e Cloud2FEM.

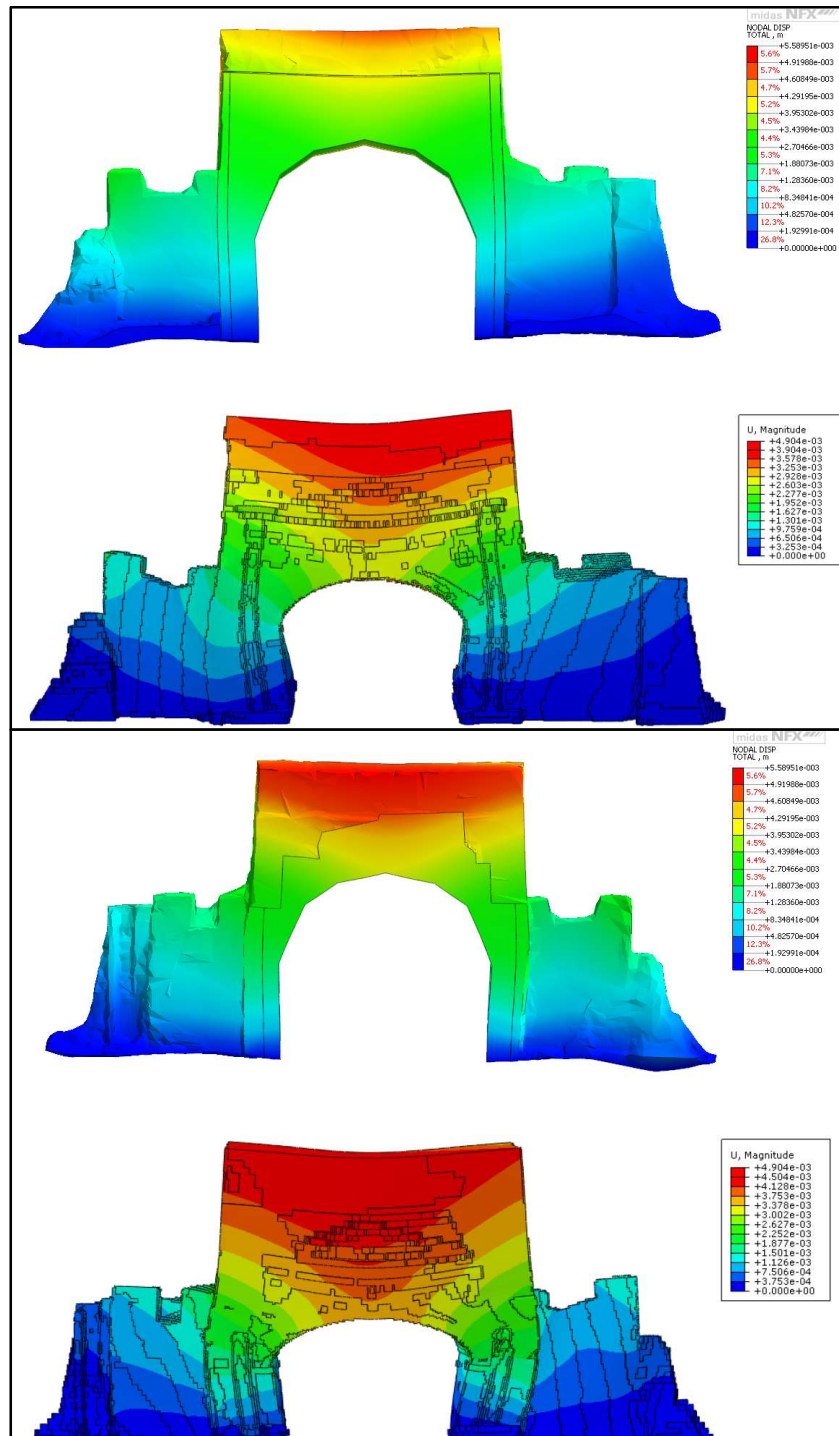


Figura 88: Confronto tra gli spostamenti sotto peso proprio ottenuti con il metodo CSF di Longo (rispettivamente sopra) e con il metodo Cloud2FEM utilizzato da Succi

Si osserva anche un discostamento maggiore degli spostamenti rispetto al modello CAD che si attesta sui 2.95 mm ma questo risultato non sorprende in quando anche il modello Cloud2FEM di Succi presenta delle ragionevoli differenze rispetto al medesimo modello CAD che sono dovute alla minor fedeltà della riproduzione. La differenza percentuale rispetto al Cloud2FEM di Succi è 20.27% mentre rispetto al CSF è 24.36%.

Successivamente dal menu *Analysis* è stato creato il caso di analisi modale ottenendo le seguenti frequenze naturali dei primi quattro modi di vibrare, Tabella 6. Nella sua tesi Succi non ha preso in considerazione il secondo modo di vibrare in quanto esso è un modo locale ed è stato studiato separatamente.

Modo	Metodo CAD (Succi)	Metodo Cloud2FEM (Succi)	Metodo CSF (Longo)	Differenza % CAD	Differenza % Cloud2FEM
1	1.9914	1.9067	1.8663	6.70	2.16
3	4.7349	5.186	5.0990	7.14	4.19
4	5.0671	5.2803	5.2530	4.06	0.52
5	8.574	9.0871	8.8958	3.62	2.15

Tabella 6: Confronto tra le frequenze naturali ottenute con i modelli CAD e Cloud2FEM di Succi e il modello CSF di Longo

Anche in questo caso si osserva che le differenze minori si riscontrano, come ci si aspetta, tra i metodi che sfruttano la nuvola di punti per generare il modello.

Nelle seguenti immagini, Figura 89, Figura 90, Figura 91, Figura 92 sono riportati gli andamenti degli spostamenti rispettivamente del modo 1, modo 3, modo 4 e modo 5 di vibrare confrontando i risultati CSF (sopra) con i risultati Cad-based e Cloud2Fem based eseguiti da Succi.

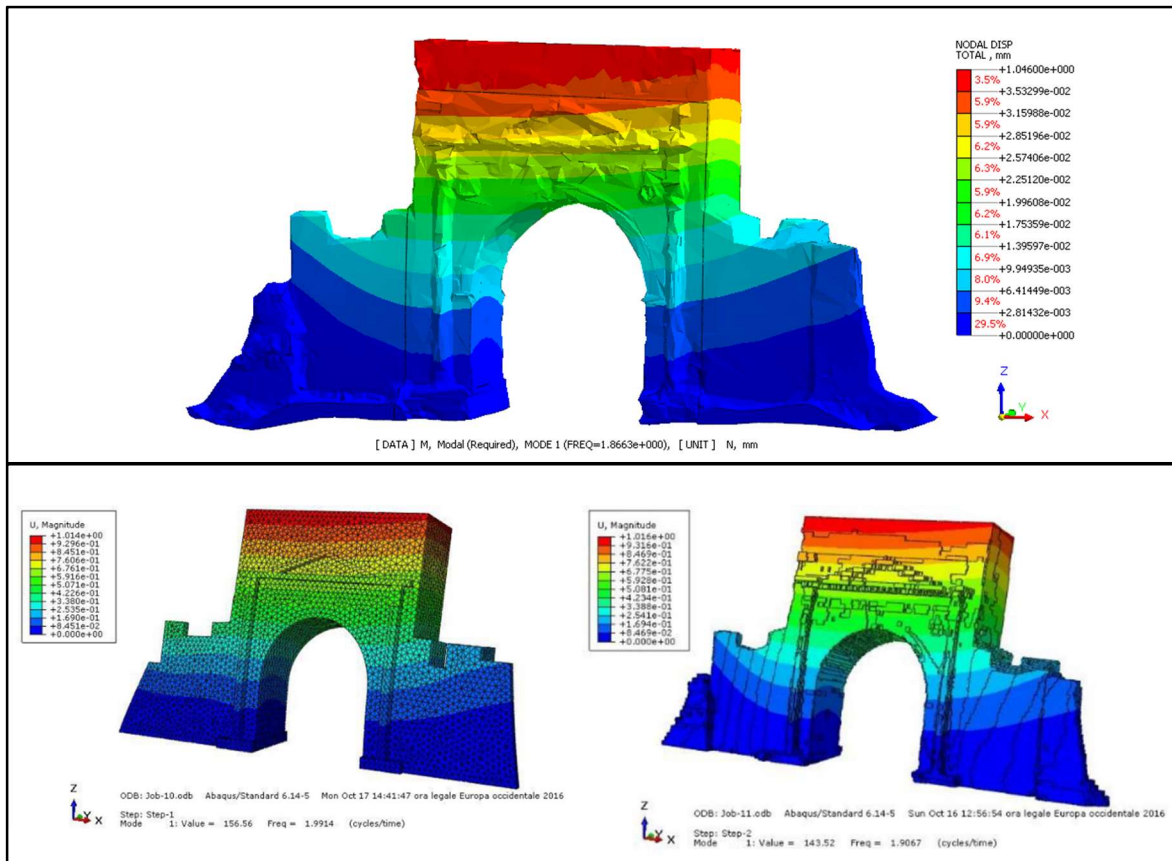


Figura 89: Confronto del primo modo di vibrare tra il modello CSF (sopra), CAD (sinistra) e Cloud2Fem (destra)

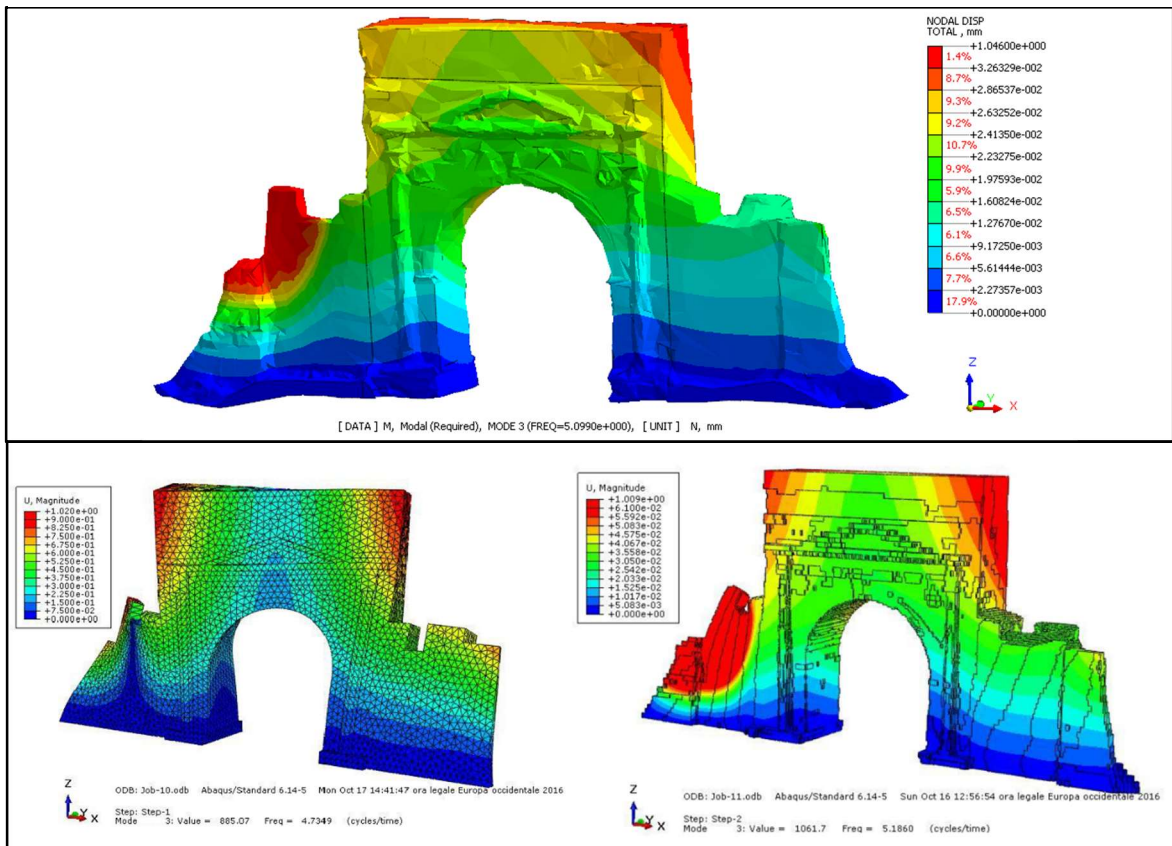


Figura 90: Confronto del terzo modo di vibrare tra il modello CSF (sopra), CAD (sinistra) e Cloud2Fem (destra)

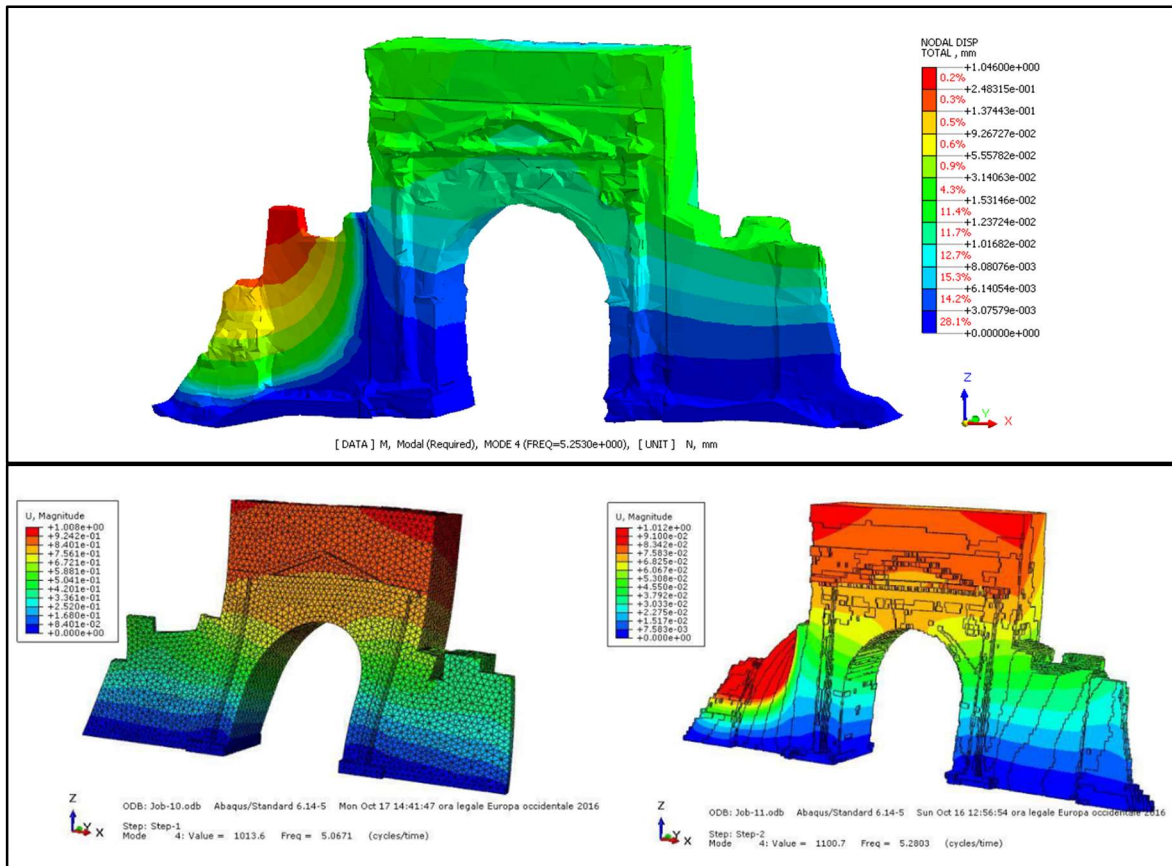


Figura 91: Confronto del quarto modo di vibrare tra il modello CSF (sopra), CAD (sinistra) e Cloud2Fem (destra)

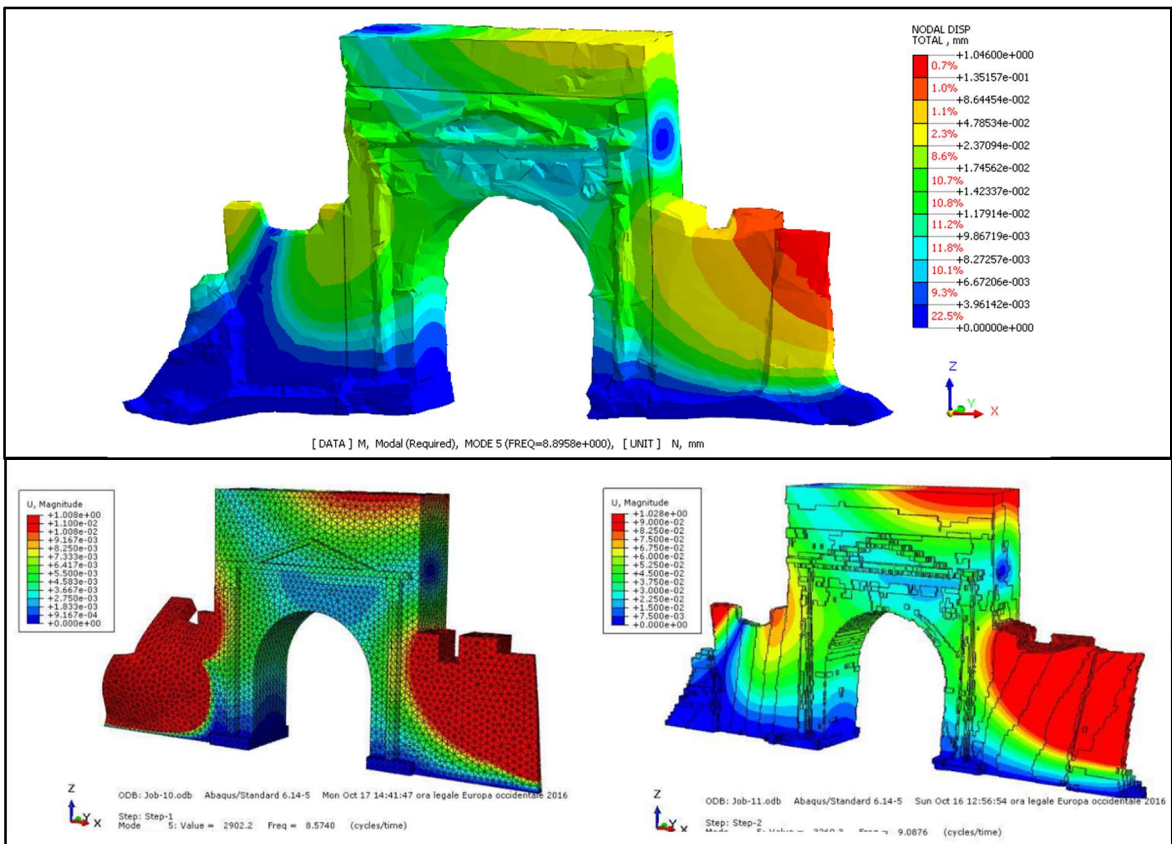


Figura 92: Confronto del quinto modo di vibrare tra il modello CSF (sopra), CAD (sinistra) e Cloud2Fem (destra)

Il passo successivo è stato quello di confrontare l'andamento dello stato tensionale del modello CSF con quelli ottenuti dal modello FEM di Serpieri. Essendo tale modello bidimensionale si è ritenuto opportuno realizzare una sezione del modello CSF passante approssimativamente lungo l'asse trasversale della struttura. Come per i confronti precedenti si è fatto riferimento ad un elemento della zona appartenente alla chiave di volta dell'arco dove è stato possibile osservare che nel modello FEM risulta una tensione σ_{xx} pari a 3.13 kg/cm² a fronte di 2.03 kg/cm² del modello CSF.

Per quanto riguarda le tensioni orizzontali, comandate da differenza di elasticità del materiale e dal rispettivo coefficiente di Poisson si è osservata una certa differenza dei valori anche se la maggior parte di essi sono dell'ordine di 10⁻² e anche in questo caso si trova un riscontro tra i due modelli, Figura 93. In Figura 94 è riportato il confronto delle tensioni normali σ_{xx} tra il modello CSF (sopra) e FEM di Serpieri (sotto), analogamente per le tensioni normali σ_{zz} in Figura 95.

	Stress (xx) (kg/cm ²)	Stress (yy) (kg/cm ²)	Stress (xy) (kg/cm ²)	Stress (xz) (kg/cm ²)	Stress (yz) (kg/cm ²)	Stress (User) (kg/cm ²)
Plate 37203	3,3249548	0,1879659	-0,1414394	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37204	3,6461410	0,0873440	-0,0899043	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37205	3,3529017	0,1011932	-0,0690285	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37206	3,4465744	0,0314868	0,0230765	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37207	3,0078690	0,1336651	-0,0710582	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37208	3,1341219	0,0811545	-0,0344368	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37209	3,3054160	0,0386111	0,0125122	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37210	3,3314776	0,0125656	0,0717284	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37211	3,2557073	0,0174276	0,0637927	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37212	3,2730430	0,0078997	0,0923448	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37213	3,1180522	0,0446652	0,0577031	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37214	3,1727911	0,0295821	0,0897139	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37215	3,2353655	0,0118510	0,0942333	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37216	3,2591122	0,0060987	0,1038802	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37217	3,2703354	0,0184280	0,1232837	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37218	3,3407274	0,0177793	0,1413579	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37219	3,1725068	0,0398249	0,1622067	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37220	3,1378918	0,0218404	0,2208345	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37221	3,2611567	0,0207232	0,2262349	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37222	0,8164119	0,2061964	-0,2549944	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37223	0,9330105	0,1993969	-0,2443179	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37224	1,0579202	0,2131833	-0,2053027	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37225	1,1485681	0,2063726	-0,1910030	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37226	1,1150946	0,1837475	-0,2158734	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37227	1,2002224	0,1747515	-0,1956949	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37228	0,9961564	0,1366111	-0,2770708	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37229	1,0746280	0,1261383	-0,2570105	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37230	1,1730786	0,1467027	-0,2153122	0,0000000	0,0000000	0,0000000

Figura 93: Plot dei risultati di Straus7. Nel riquadro i valori dell'elemento in chiave preso come riferimento

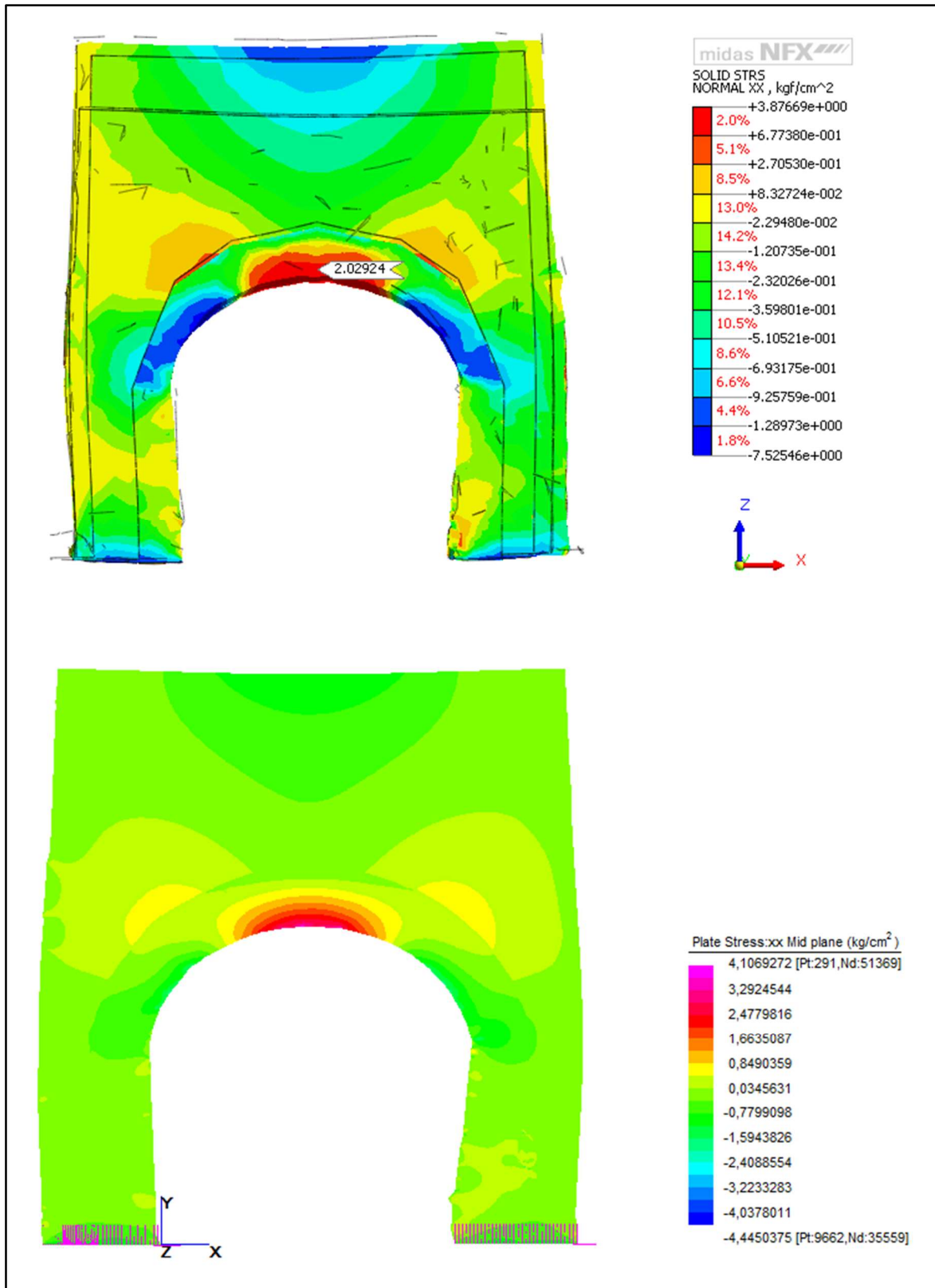


Figura 94: Tensioni normali σ_{xx} ; confronto tra il modello CSF (sopra) e il modello FEM di Serpieri (sotto)

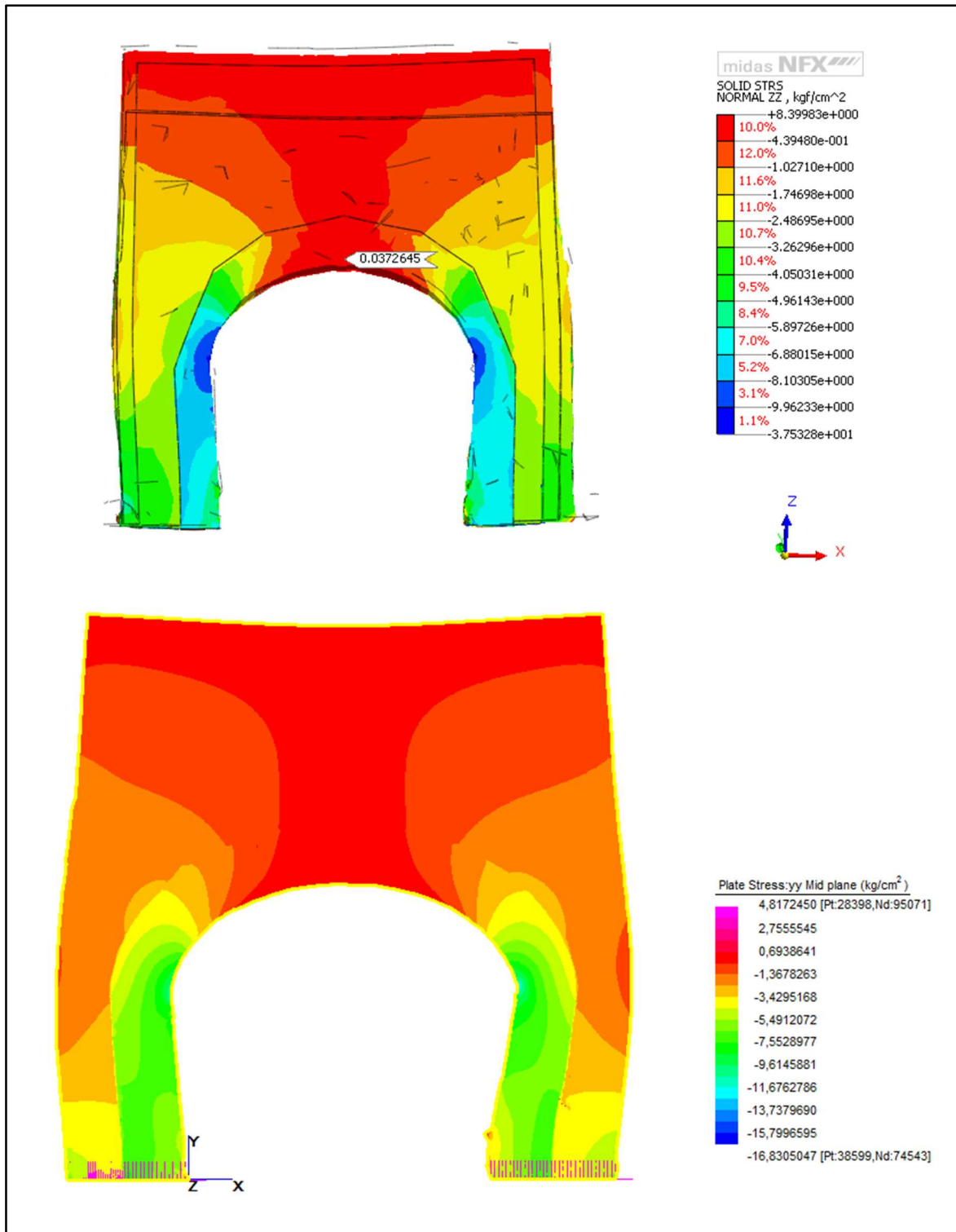


Figura 95: Tensioni normali σ_{zz} ; confronto tra il modello CSF (sopra) e il modello FEM di Serpieri (sotto)

5.2.2. Creazione del modello ad elementi distinti con un software BIM

La creazione del modello dell'arco con Autodesk Revit è risultata sensibilmente più difficile rispetto all'esempio precedente a causa della struttura non simmetrica e alla non verticalità degli elementi.

Le fasi preliminari sono uguali a quelle viste in precedenza, dal menu *inserisci* si è selezionato il comando *nuvola di punti* e si è selezionato il formato *rcs*, quindi la nuvola è stata ruotata e scalata modificando il fattore di scala presente in *modifica tipo* al valore 2.5320925 ricavato tramite una semplice proporzione mediante la misura sul modello di una distanza nota.

Il primo passo è stato quello di creare i livelli passanti per i punti caratteristici della struttura quali i cambiamenti di forma, di spessore e di materiale per creare i piani di lavoro sui quali è stato possibile creare i vari oggetti, Figura 96.

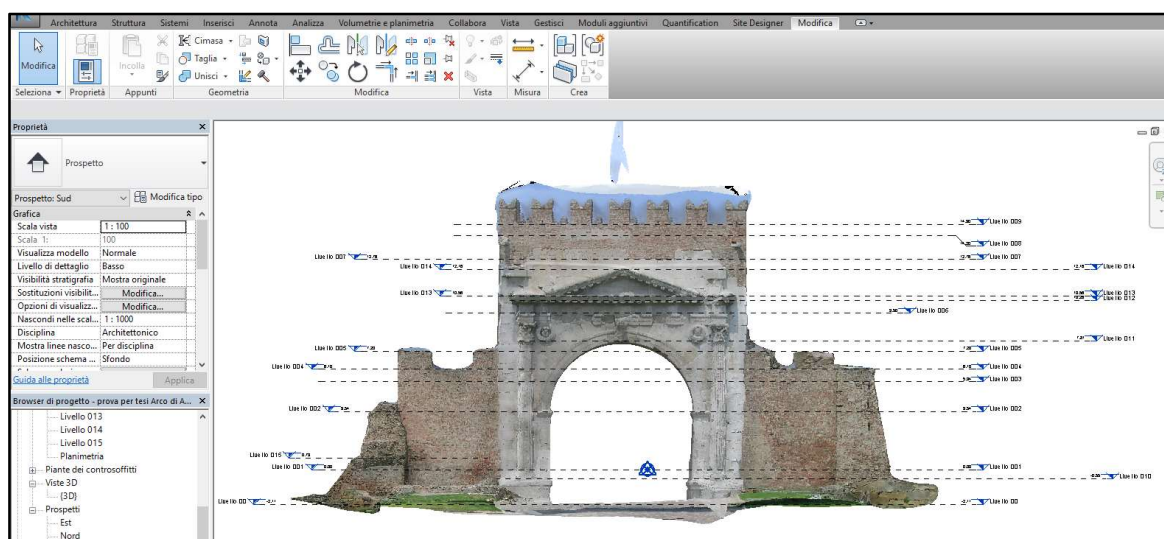


Figura 96: Creazione dei livelli in Revit per creare i diversi piani di lavoro

Per modellare il corpo centrale dell'edificio è stato usato lo strumento *muro architettonico*. La scelta non è delle più comode ma è stata obbligata dalla difficoltà riscontrata con altri metodi di realizzare l'apertura dell'arco. Come visto anche nelle precedenti prove si è assunto uno spessore della pietra di rivestimento e della muratura esterna di circa 70 cm, tuttavia il corpo centrale non è perfettamente a piombo quindi è stato creato un muro dello spessore di

150 cm e successivamente si è proceduto a sottrarre un muro generico della forma necessaria per ottenere la parete inclinata. Per fare ciò si è creato un *muro generico vuoto* selezionando *modello locale* dal menu *Componente* nella scheda *Architettura* come mostrato in Figura 97.

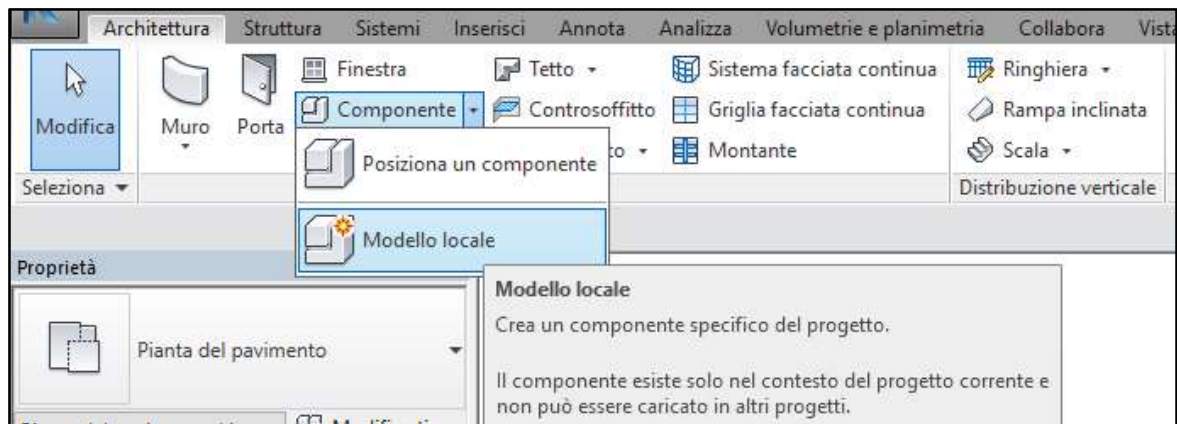


Figura 97: Creazione di un muro di forma generica mediante il comando *Modello locale* di Revit

A questo punto il sistema fornisce un elenco di famiglie, dopo aver selezionato *Muro* ed aver inserito un nome si può selezionare il comando *Vuoti* e infine *Unione*, Figura 98. Questo comando consente di creare solidi, in questo caso di sottrazione, aventi base inferiore e superiore di forma differente. È necessario però che le due basi abbiano lo stesso numero di vertici o almeno che differiscano di poco altrimenti il solido ottenuto non rispetterà la forma desiderata.

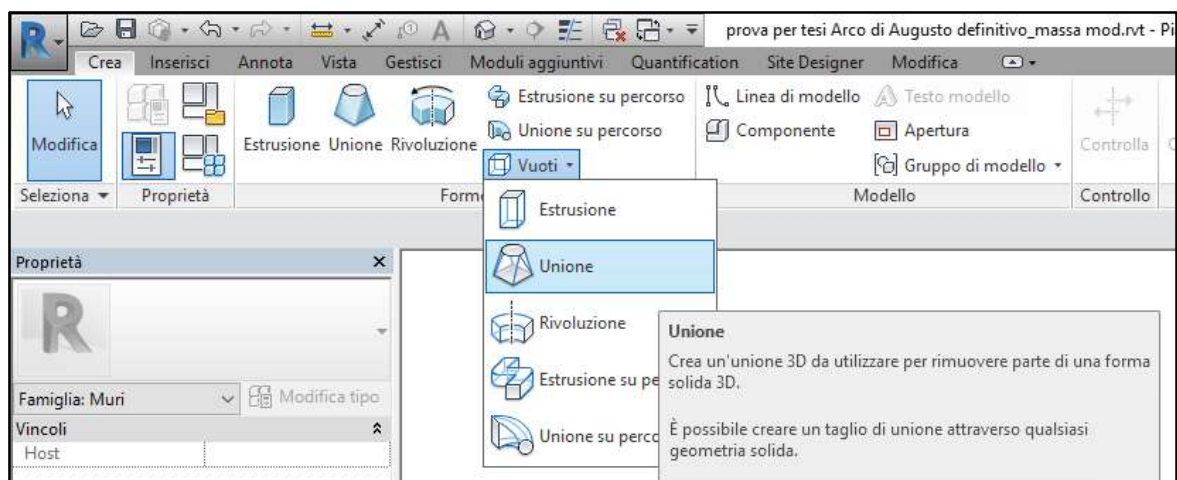


Figura 98: Comando *Unione* di Revit per creare un solido che abbia le basi di forma differente.

Ora è possibile recarsi prima al livello inferiore e poi a quello superiore per disegnare di due bordi partendo dalla nuvola di punti e discostandosi di 70 cm da essa.

Infine recandosi sulla vista 3D è possibile selezionare il solido creato e con il comando *Taglia* ottenere il muro architettonico con la sagoma desiderata, Figura 99. Questa procedura va ripetuta per ognuno dei quattro lati del muro architettonico.

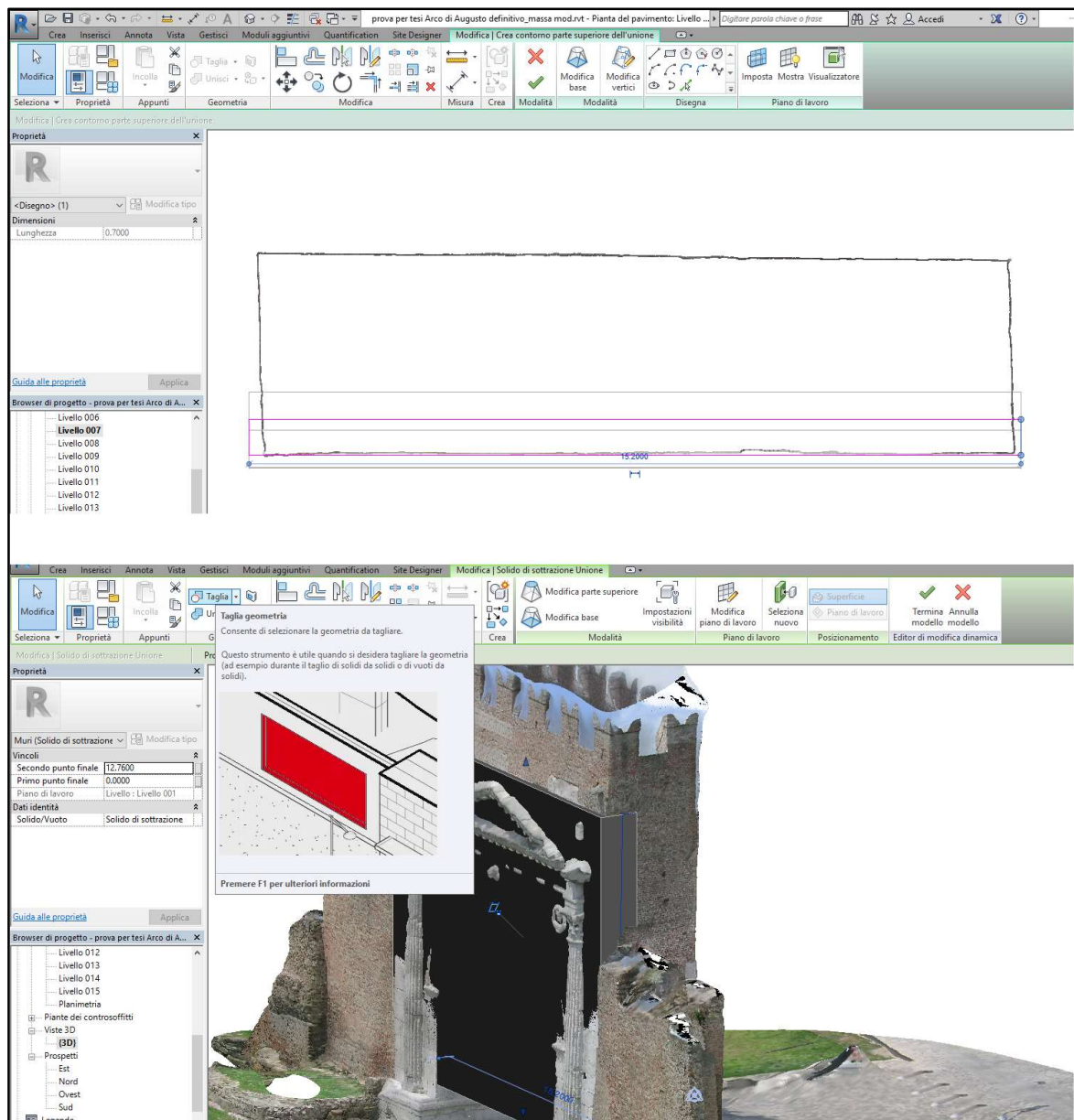


Figura 99: Sagomatura del muro architettonico tramite il comando *Unione* e *Taglia*

Questa procedura è stata utilizzata per realizzare le due facciate e il solido compreso tra di esse per il quale è stato creato un apposito muro sagomato in modo da ottenere un perfetto collegamento tra i tre solidi.

Le altre parti del corpo centrale, non interessate dall'apertura, sono state modellate con l'omonimo comando *Unione* presente nel menu *forme*, Figura 100. Il funzionamento è identico a quello visto per il solido di sottrazione con l'unica differenza che il volume disegnato viene gestito come “pieno” e non come “vuoto”.

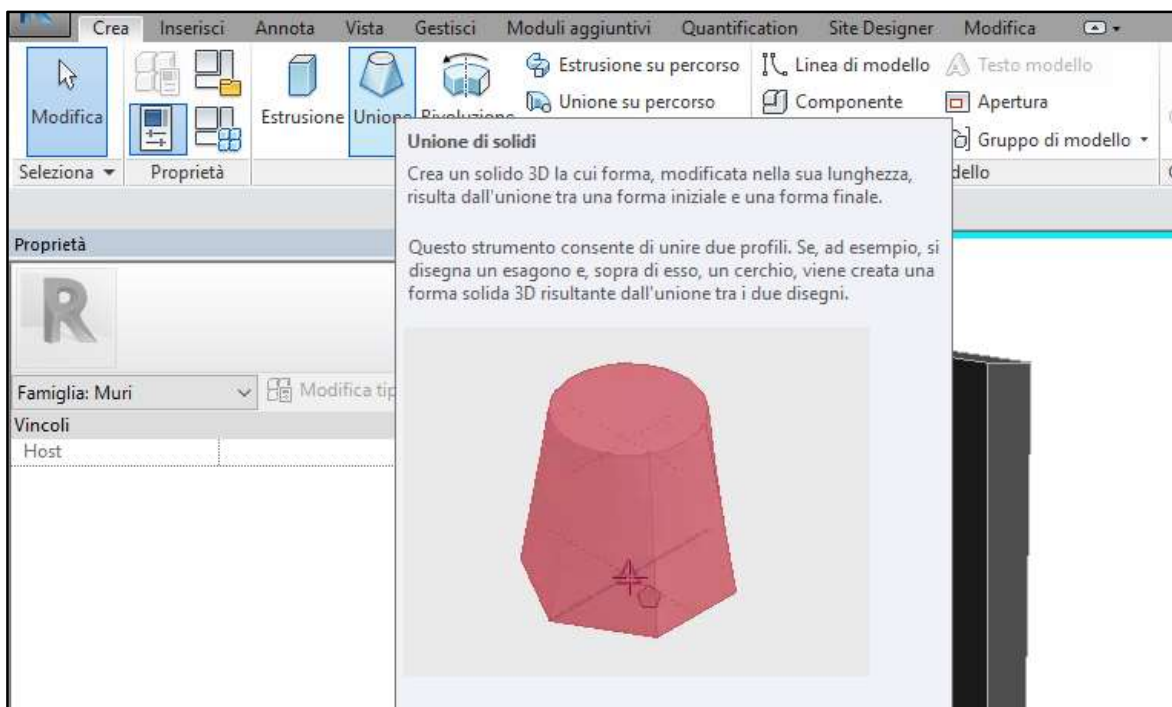


Figura 100: Schermata del comando unione di solidi

Ottenendo il risultato di Figura 101.

Una volta eseguiti tutti gli elementi solidi è stato possibile realizzare l'apertura dell'arco.

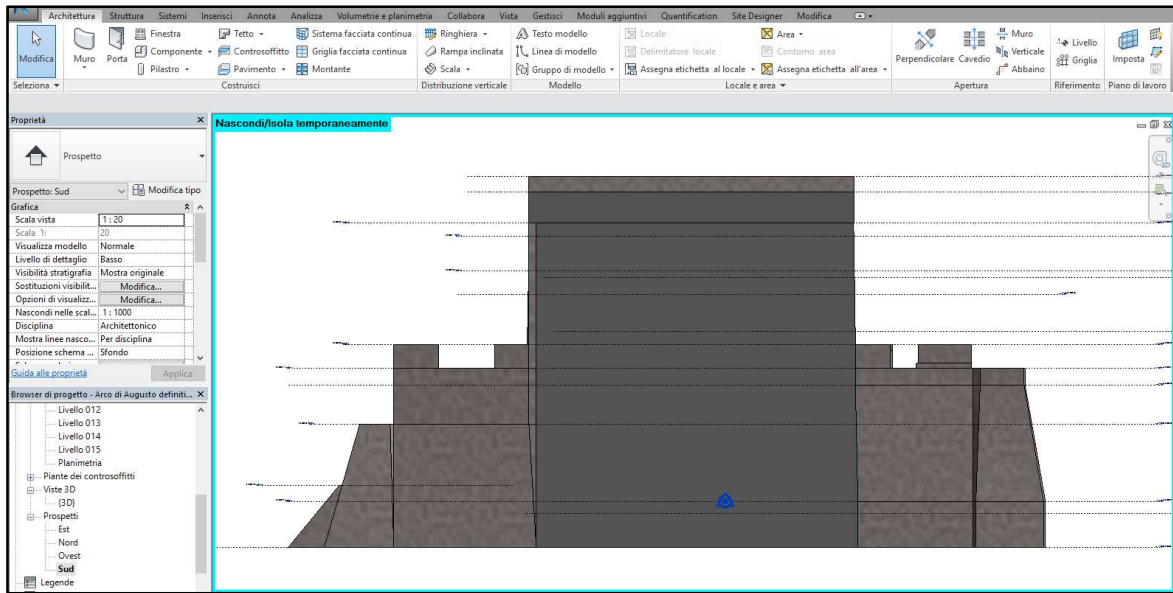


Figura 101: Modello degli elementi solidi dell'Arco di Augusto

Grazie all'utilizzo dell'oggetto *muro architettonico* la realizzazione dell'apertura è risultata molto agevole, è bastato infatti entrare nella vista frontale, selezionare il primo muro e attivare il comando *modifica profilo* andando a modificare i bordi seguendo il contorno della nuvola di punti tramite gli strumenti di disegno, Figura 102.

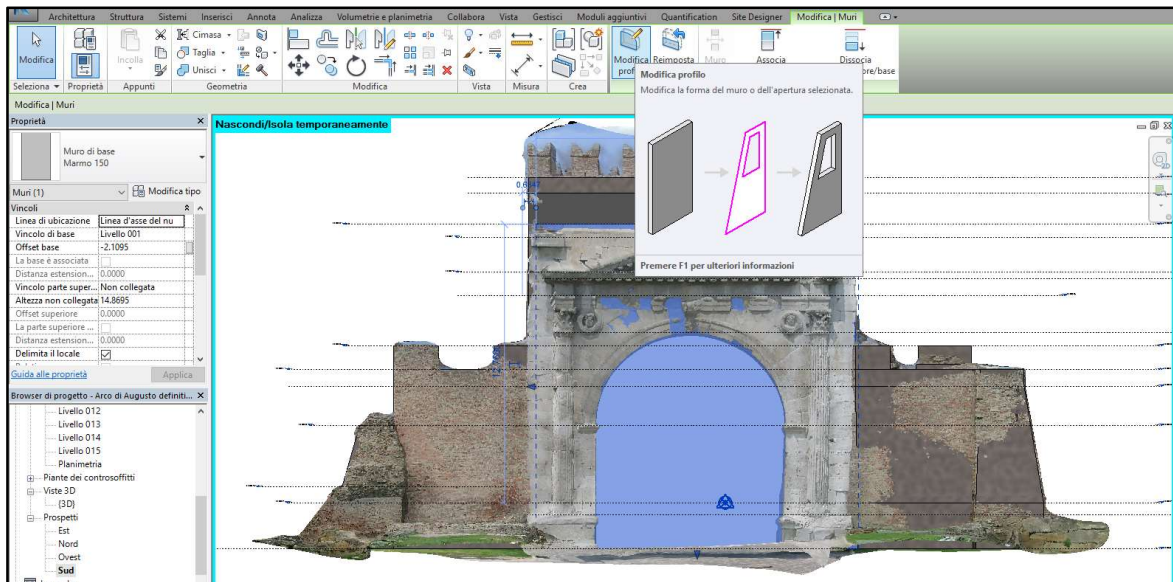


Figura 102: Realizzazione dell'apertura tramite il comando *Modifica profilo*

Questa operazione è stata eseguita sui tre elementi costituenti la parte bassa del corpo centrale, le due facciate e il solido tra di esse. Infine il modello è stato completato usando i comandi visti in precedenza per creare le pareti laterali, andando a schematizzare le quattro colonne semicircolari con i rispettivi basamenti e capitelli e i due frontoni sopra l'apertura ottenendo il modello finale, Figura 103.

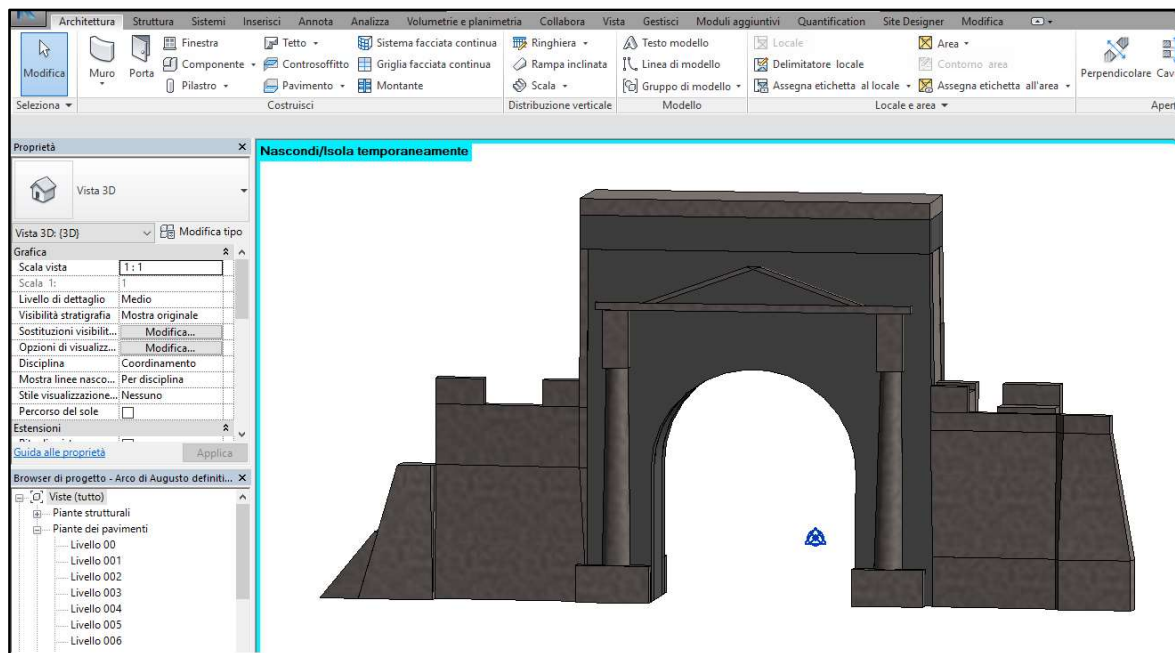


Figura 103: Modello completo dell'Arco di Augusto

Come già visto in precedenza il modello è stato esportato in formato *ACIS* per poi essere importato in Midas NFX dove attraverso il comando *Solid fuse* del menu *Geometry* sono stati uniti assieme tutti gli oggetti costituiti dallo stesso materiale. Come è già stato visto dal menu *Mesh* selezionando i comandi *Matl* e *Prop* è possibile impostare le caratteristiche dei materiali e le rispettive proprietà che sono state assunte identiche a quelle utilizzate nel modello creato direttamente dalla nuvola di punti e riportate in “Tabella 4: Proprietà meccaniche assunte per l'Arco di Augusto”.

Dal menu *Static/Heat Analysis* attraverso il comando *Constraint* è stato imposto il vincolo di incastro a terra e con il comando *Auto* la congruenza tra gli oggetti di materiale diverso, e infine con il comando *Gravity* è stata assegnata la condizione di carico di peso proprio. A questo punto il modello è pronto per impostare ed eseguire le analisi.

Con il comando *General* del menu *Analysis* sono state generate due analisi, un'analisi lineare per studiare il comportamento sotto peso proprio e un'analisi modale per osservare le differenze sui primi modi di vibrare e sulle frequenze naturali, in Figura 104 sono riportate le due schermate.

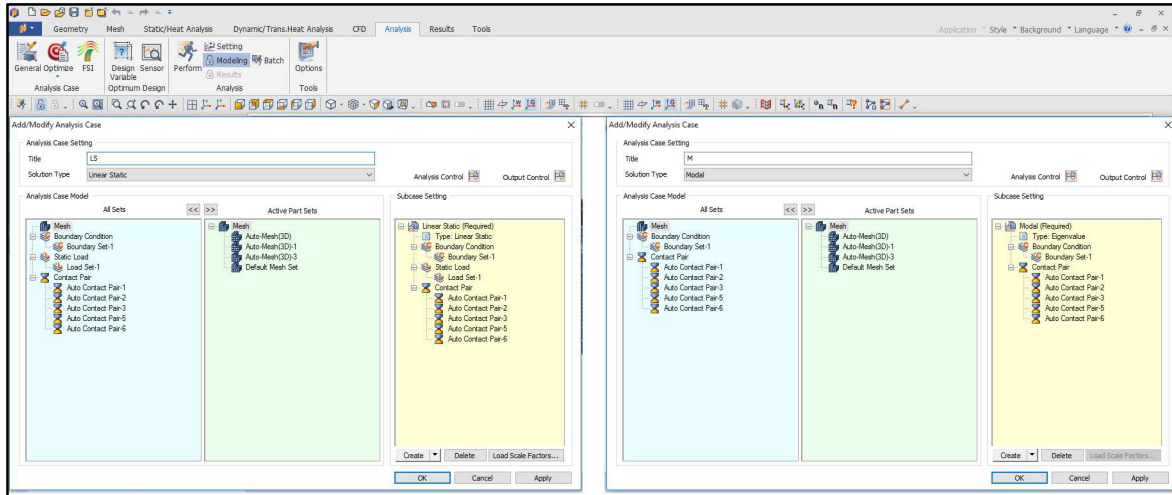


Figura 104: Creazione dell'analisi statica lineare a destra e modale a sinistra

Confrontando i risultati ottenuti con il modello CAD si può notare che essi sono praticamente coincidenti con un abbassamento massimo della chiave di volta compresa tra i 2.8-3.1 mm del metodo BIM a fronte dei 2.7-3 mm con il modello Cad realizzato da Succi. In Figura 105 sono messi a confronto gli andamenti delle deformazioni per i modelli BIM e Cad-Based realizzato da Succi.

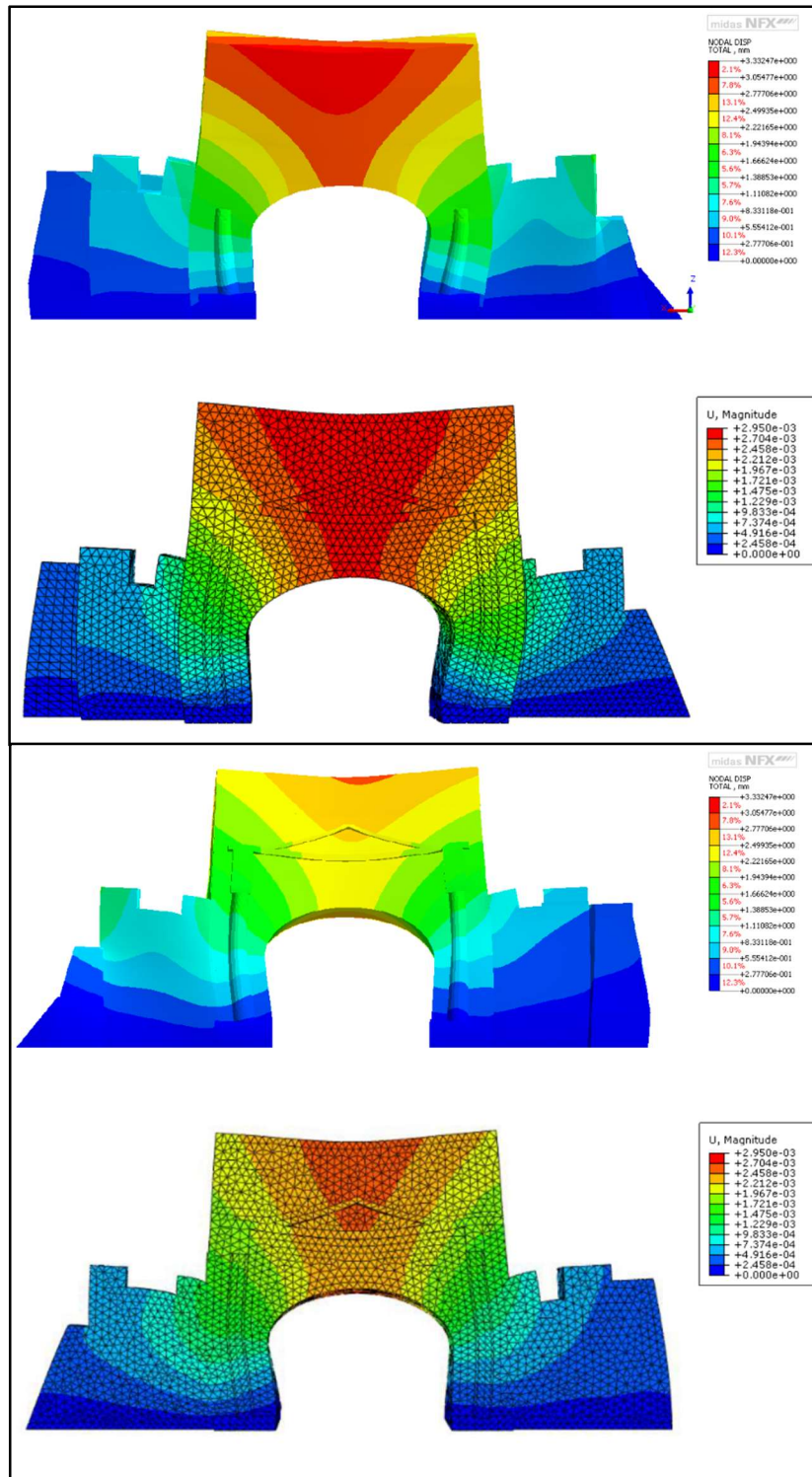


Figura 105: Confronto tra gli spostamenti sotto peso proprio ottenuti con modello BIM (rispettivamente sopra) e con il modello CAD2Fem di Succi

Un altro risultato a riscontro della validità dei modelli si evince dal confronto con il modello FEM realizzato in Straus7 da Maurizio Serpieri nella sua tesi.

In questo caso è stato studiato solo il corpo centrale del monumento utilizzando elementi 2D *Plate*, separando l'arco interno costituito dalla Pietra di Nabresina *Roman Stone* dal resto costituito da muratura a sacco considerando quindi la muratura esterna e il riempimento come un unico oggetto di materiale omogeneo, Figura 106. Nonostante le differenze geometriche tra modelli bidimensionali e tridimensionali i risultati ottenuti sono decisamente compatibili con uno spostamento totale del concio centrale compreso tra i 2,7 e i 2,8 mm.

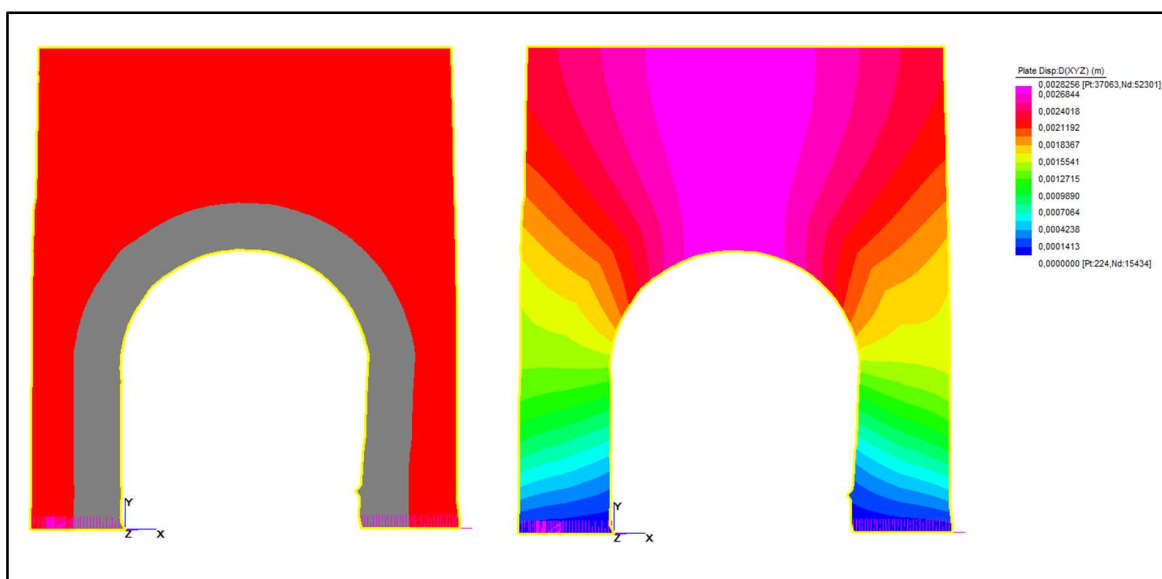


Figura 106: A sinistra il modello FEM dell'Arco di Augusto eseguito nel 2006 da Serpieri, a destra gli spostamenti dello stesso modello sotto peso proprio

Per quanto riguarda l'analisi modale si è osservato che gli spostamenti del modello BIM sono più simili al modello Cloud2Fem rispetto al modello CAD come invece ci si aspetterebbe. I risultati sono stati confrontati anche con l'analisi modale FEM di Serpieri dove la corrispondenza è evidente nel primo modo di vibrare e minore negli altri. Questa differenza è sicuramente dovuta all'assenza in quest'ultimo modello della muratura ai lati del monumento che comporta una minore massa e soprattutto una minore rigidità della struttura lungo l'asse x che però interessa poco il primo modo di vibrare che agisce invece flessionalmente lungo l'asse y in cui la muratura, di spessore minore rispetto al corpo centrale, ha rigidità minore.

Nella Tabella 7 vengono riportate le frequenze naturali dei modi 1, 3, 4, 5 trascurando il secondo modo in quanto modo locale.

Modo	Metodo CAD (Succi)	Metodo Cloud2FEM (Succi)	Metodo CSF (Longo)	Modello Fem (Serpieri)	Metodo BIM (Longo)
1	1.9914	1.9067	1.8663	2.7454	2.0010
3	4.7349	5.186	5.0990	8.1921	5.1095
4	5.0671	5.2803	5.2530	8.8263	5.3187
5	8.574	9.0871	8.8958	10.2060	6.5782

Tabella 7: Confronto tra le frequenze naturali ottenute con i modelli CAD (Succi), Cloud2FEM (Succi), CSF (Longo), modello FEM (Serpieri) e il modello BIM (Longo)

Nella Tabella 8 invece si riportano le differenze percentuali delle frequenze naturali del metodo BIM rispetto agli altri metodi descritti

Modo	Differenza % CAD (Succi)	Differenza % Cloud2FEM (Succi)	Differenza % CSF (Longo)	Differenza % Fem (Serpieri)
1	-0.48	-4.71	-6.73	37.20
3	-7.33	1.50	-0.21	60.33
4	-4.73	-0.72	-1.24	65.95
5	30.34	38.14	35.23	55.15

Tabella 8: Differenze percentuali delle frequenze naturali del metodo BIM rispetto agli altri metodi descritti

Nelle seguenti immagini, Figura 107, Figura 108, Figura 109 e Figura 110 sono riportati i risultati grafici delle analisi modali in cui si può confrontare il metodo BIM con il metodo CAD e Cloud2FEM di Succi.

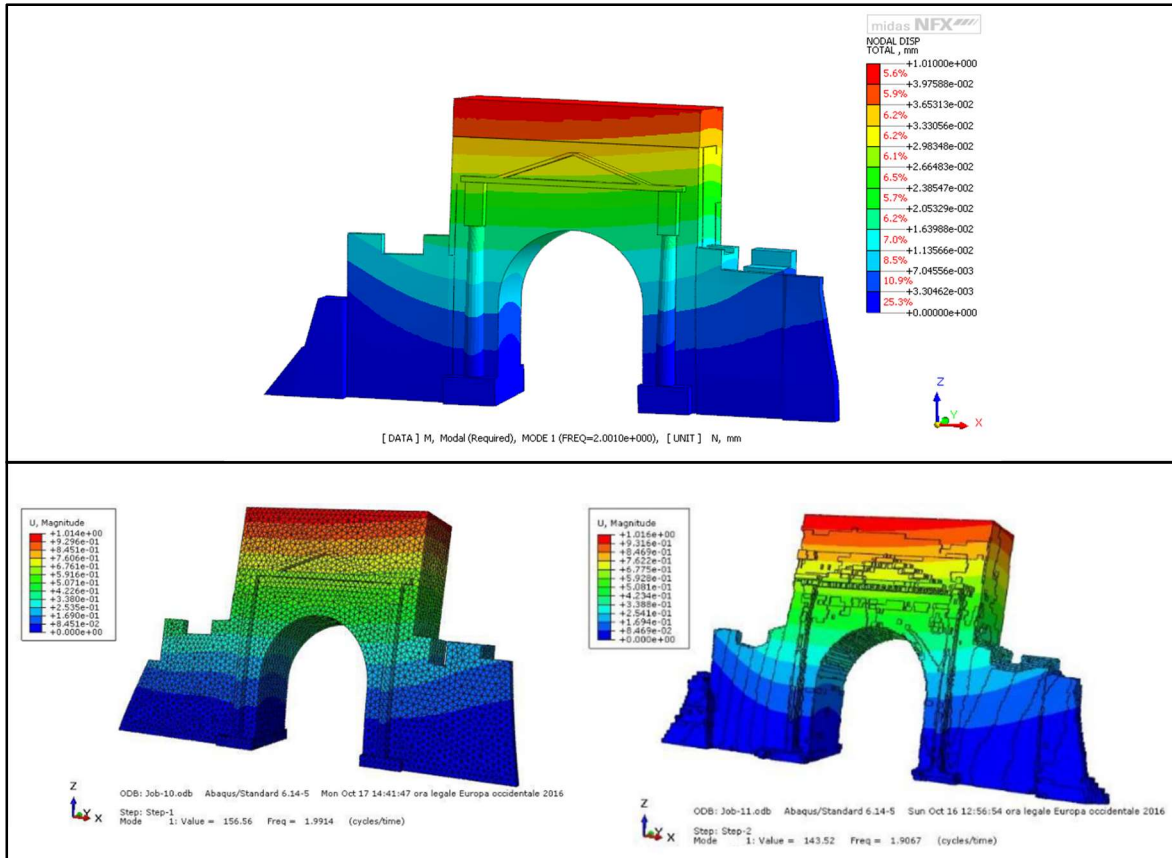


Figura 107: Confronto del primo modo di vibrare tra il modello BIM (sopra), CAD (sinistra) e Cloud2Fem (destra)

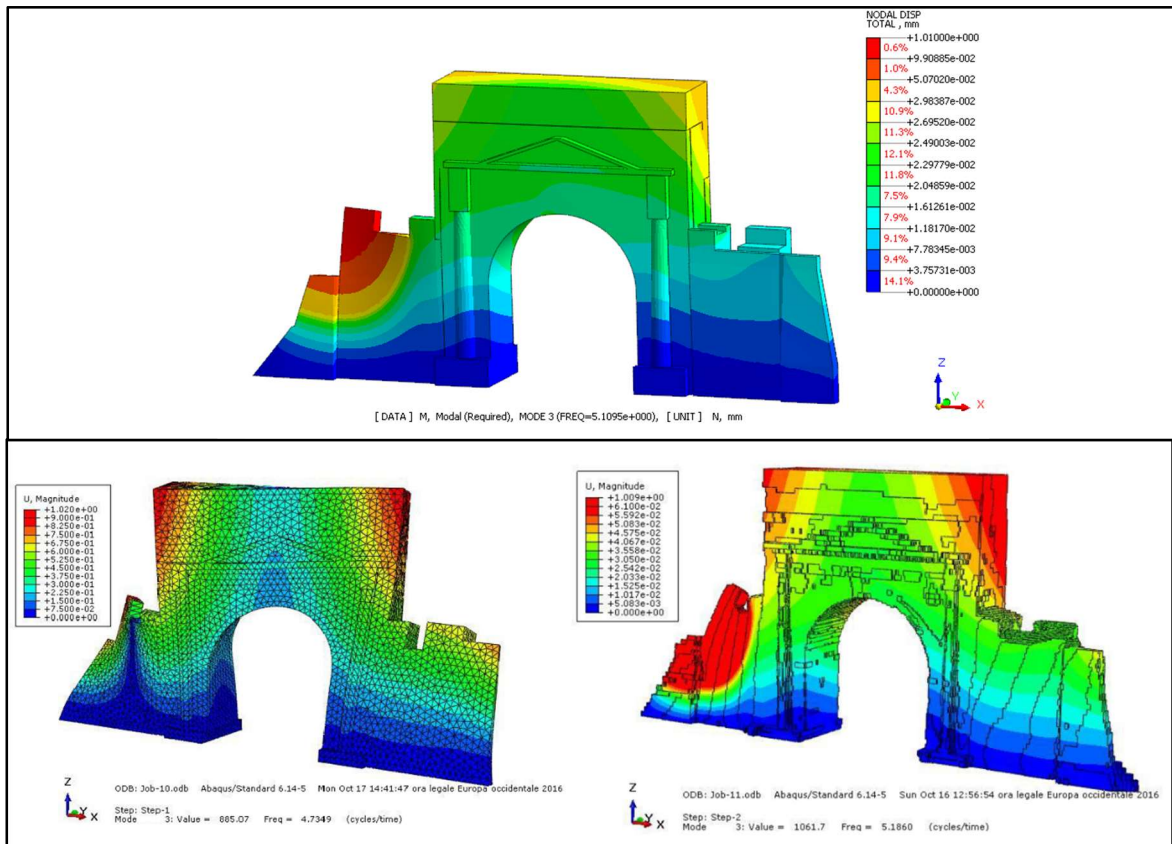


Figura 108: Confronto del secondo modo di vibrare tra il modello BIM (sopra), CAD (sinistra) e Cloud2Fem (destra)

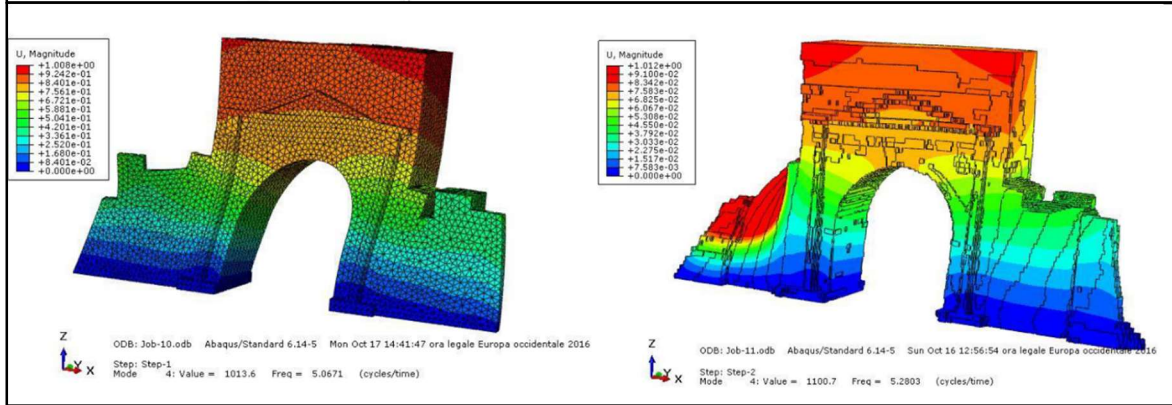
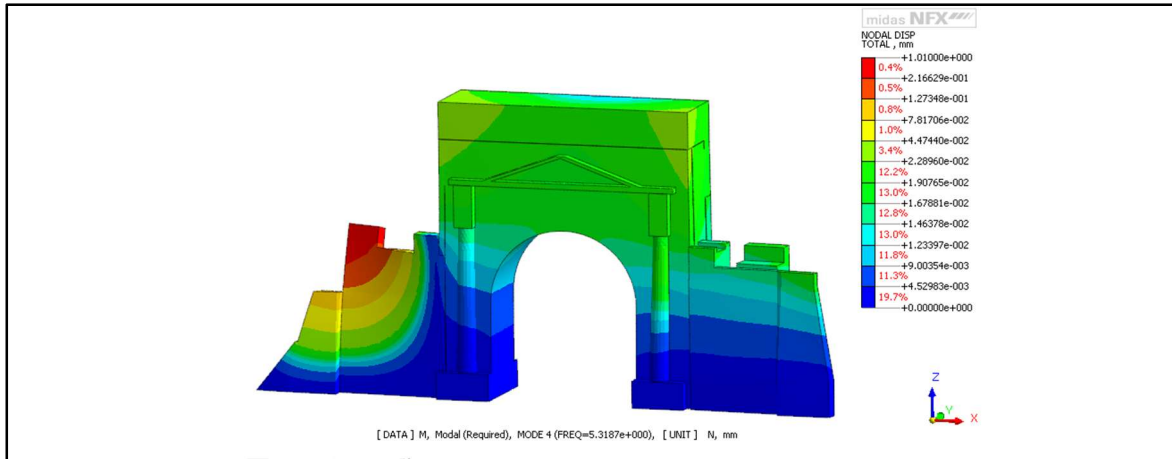


Figura 109: Confronto del quarto modo di vibrare tra il modello BIM (sopra), CAD (sinistra) e Cloud2Fem (destra)

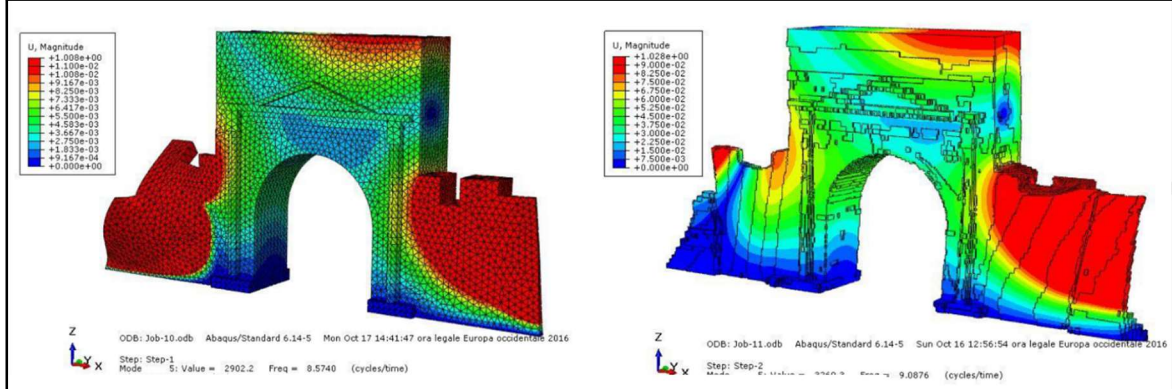
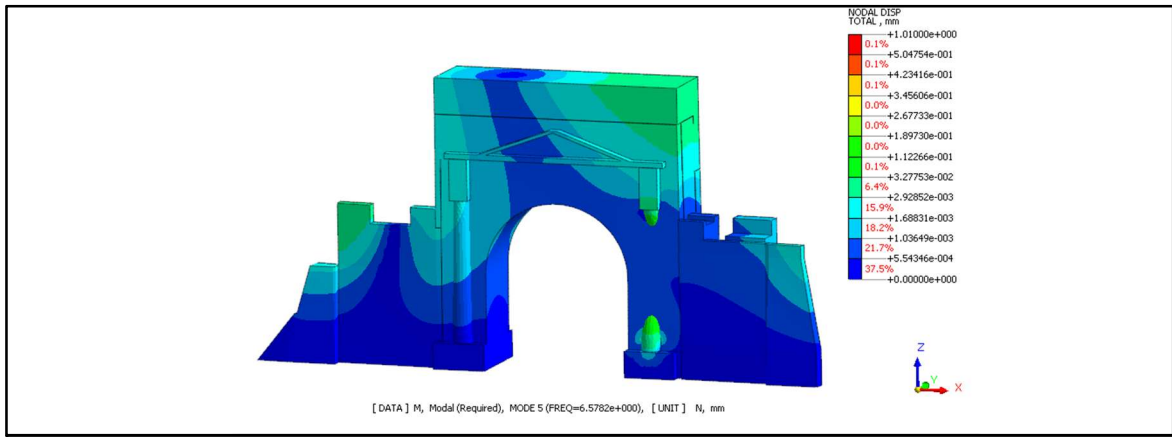


Figura 110: Confronto del quinto modo di vibrare tra il modello BIM (sopra), CAD (sinistra) e Cloud2Fem (destra)

Il passo successivo è stato quello di confrontare l'andamento dello stato tensionale del modello BIM con quelli ottenuti dal modello FEM di Serpieri. Essendo tale modello bidimensionale si è ritenuto opportuno realizzare una sezione del modello BIM passante approssimativamente lungo l'asse trasversale della struttura. Come per i confronti precedenti si è fatto riferimento ad un elemento della zona appartenente alla chiave di volta dell'arco dove è stato possibile osservare che nel modello FEM risulta una tensione σ_{xx} pari a 3.13 kg/cm^2 a fronte di 1.85 kg/cm^2 del modello BIM.

Per quanto riguarda le tensioni orizzontali, comandate da differenza di elasticità del materiale e dal rispettivo coefficiente di Poisson si è osservata una certa differenza dei valori anche se la maggior parte di essi sono dell'ordine di 10^{-2} , come mostrato in Figura 111, e anche in questo caso si trova un riscontro positivo tra i due modelli.

In Figura 112 è riportato il confronto delle tensioni normali σ_{xx} tra il modello BIM (sopra) e FEM di Serpieri (sotto), analogamente per le tensioni normali σ_{zz} in Figura 113.

	Stress (xx) (kg/cm ²)	Stress (yy) (kg/cm ²)	Stress (xy) (kg/cm ²)	Stress (xz) (kg/cm ²)	Stress (yz) (kg/cm ²)	Stress (User) (kg/cm ²)
Plate 37203	3,3249548	0,1879659	-0,1414394	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37204	3,6461410	0,0873440	-0,0899043	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37205	3,3529017	0,1011932	-0,0690285	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37206	3,4465744	0,0314868	0,0230765	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37207	3,0078690	0,1336651	-0,0710582	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37208	3,1341219	0,0811545	-0,0344368	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37209	3,3054160	0,0386111	0,0125122	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37210	3,3314776	0,0125656	0,0717284	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37211	3,2557073	0,0174276	0,0637927	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37212	3,2730430	0,0078997	0,0923448	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37213	3,1180522	0,0446652	0,0577031	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37214	3,1727911	0,0295821	0,0897139	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37215	3,2353655	0,0118510	0,0942333	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37216	3,2591122	0,0060987	0,1038802	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37217	3,2703354	0,0184280	0,1232837	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37218	3,3407274	0,0177793	0,1413579	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37219	3,1725068	0,0398249	-0,1622067	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37220	3,1378918	0,0218404	0,2208345	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37221	3,2611567	0,0207232	0,2262349	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37222	0,8164119	0,2061964	-0,2549944	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37223	0,9330105	0,1993969	-0,2443179	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37224	1,0579202	0,2131833	-0,2053027	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37225	1,1485681	0,2063726	-0,1910030	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37226	1,1150946	0,1837475	-0,2158734	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37227	1,2002224	0,1747515	-0,1956949	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37228	0,9961564	0,1366111	-0,2770708	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37229	1,0746280	0,1261383	-0,2570105	0,0000000	0,0000000	0,0000000
Plate 37230	1,1730786	0,1467027	-0,2153122	0,0000000	0,0000000	0,0000000

Figura 111: Plot dei risultati di Straus7. Nel riquadro i valori dell'elemento in chiave preso come riferimento

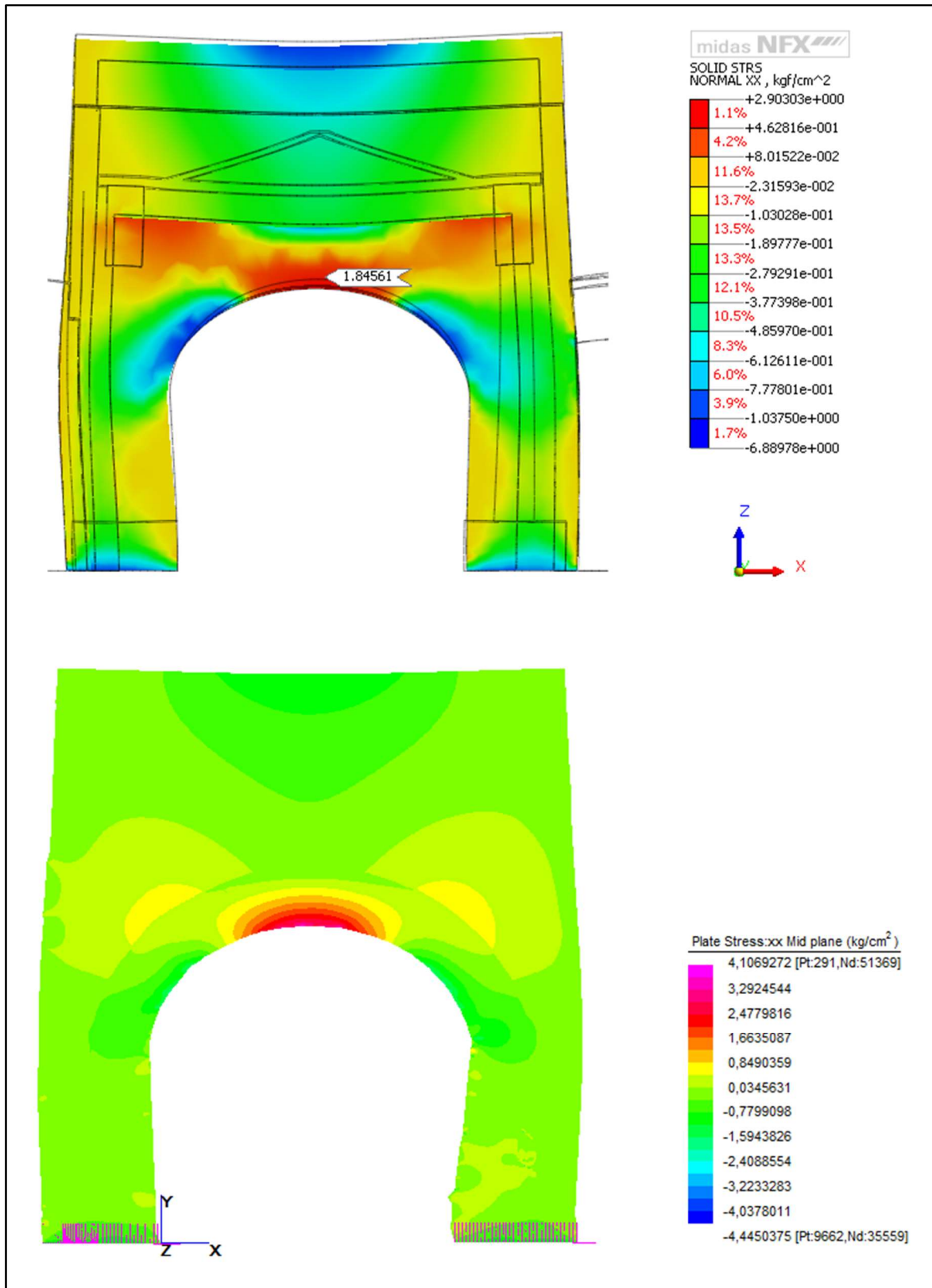


Figura 112: Tensioni normali σ_{xx} ; confronto tra il modello CSF (sopra) e il modello FEM di Serpieri (sotto)

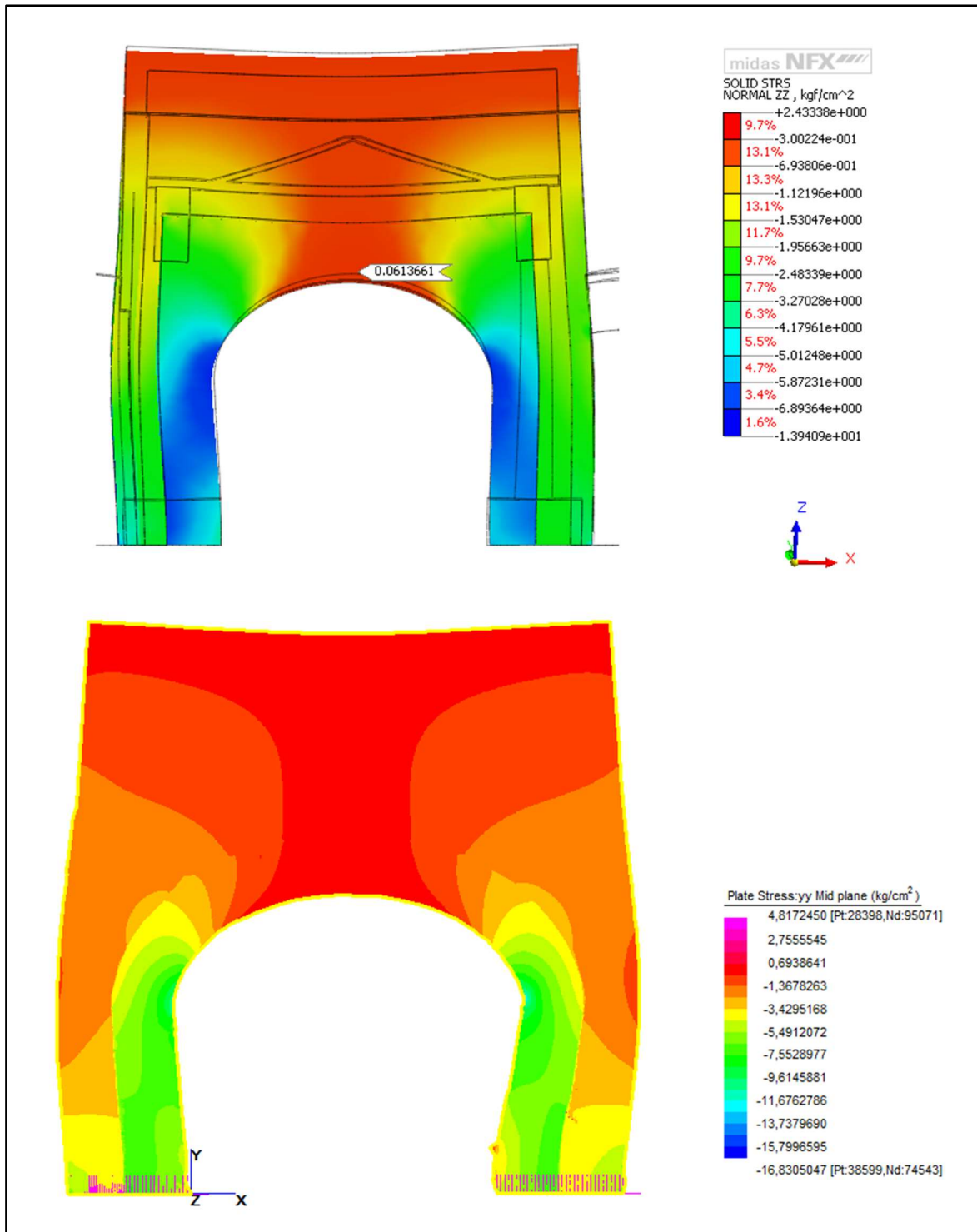


Figura 113: Tensioni normali σ_{zz} ; confronto tra il modello CSF (sopra) e il modello FEM di Serpieri (sotto)

5.3. Il caso del campanile di Sant' Apollinare Nuovo in Ravenna

Un'altra struttura che si è cercato di studiare è il campanile a sezione cilindrica di Sant'Apollinare Nuovo sito a Ravenna. Questa struttura risulta di notevole interesse non solo per la sua geometria tipica di quella zona geografica e per i pochissimi studi in merito dovuti anche allo scarso materiale storico rinvenibile, ma anche perché questa costruzione si differenzia dalle due precedentemente descritte per essere cava al suo interno. Purtroppo il materiale a mia disposizione, un rilievo con laser scanner e un rilievo fotografico, era incompleto e non mi ha consentito di realizzare il modello tridimensionale di partenza. Tali rilievi erano infatti mirati all'acquisizione della adiacente basilica pertanto tutta la parte posteriore del campanile e la sua copertura non sono mai stati rilevati.

Nonostante questi dati parziali si è cercato ugualmente di ottenere un volume chiuso da importare in Midas NFX ad esempio cercando di fondere la mesh reale con quella di una porzione di cilindro cavo che riuscisse ad approssimare la geometria della struttura, tuttavia i numerosi tentativi non sono andati a buon fine.

Un'altra difficoltà riscontrata è stata quella di assegnare uno spessore alla mesh esterna in modo da riuscire ad approssimare la larghezza della muratura; a tal proposito sono state provate diverse vie utilizzando Rhinoceros5 ma nessuna di esse è stata soddisfacente. All'inizio si è cercato un modo per estrarre la mesh della muratura esterna verso l'interno, ma essa, essendo generata da una nuvola di punti ottenuta da una superficie scabra, era composta da elementi triangolari con normali orientate in maniera caotica; il comando di estrusione prevede di creare un elemento solido percorrendo appunto tale normale ottenendo di conseguenza un volume con oggetti che si compenetravano e non rispettavano la congruenza dei nodi con gli elementi adiacenti. È evidente che tale volume fosse inutilizzabile.

Un altro tentativo è stato quello di utilizzare il comando *offset*, andando quindi a creare una superficie interna uguale a quella esterna, tuttavia a causa della geometria cilindrica la mesh generata internamente insisteva su un arco di circonferenza con raggio minore di conseguenza le numerose aperture del campanile venivano deformate lungo la direzione orizzontale rendendo particolarmente complicato il collegamento del bordo esterno con quello interno.

Dopo numerosi tentativi si è giunti alla conclusione che l'unica possibilità fosse quella di realizzare un rilievo interno in modo da unire le due mesh ottenendo un volume chiuso in cui generare la mesh 3D indispensabile per l'analisi FEM. Non si è potuto però mettere in pratica questa opzione in quanto non è stato autorizzato l'accesso all'interno della struttura ritenuto inagibile dalla curia di Ravenna. In Figura 114 la mesh parziale ottenuta dalle immagini del rilievo fotografico.

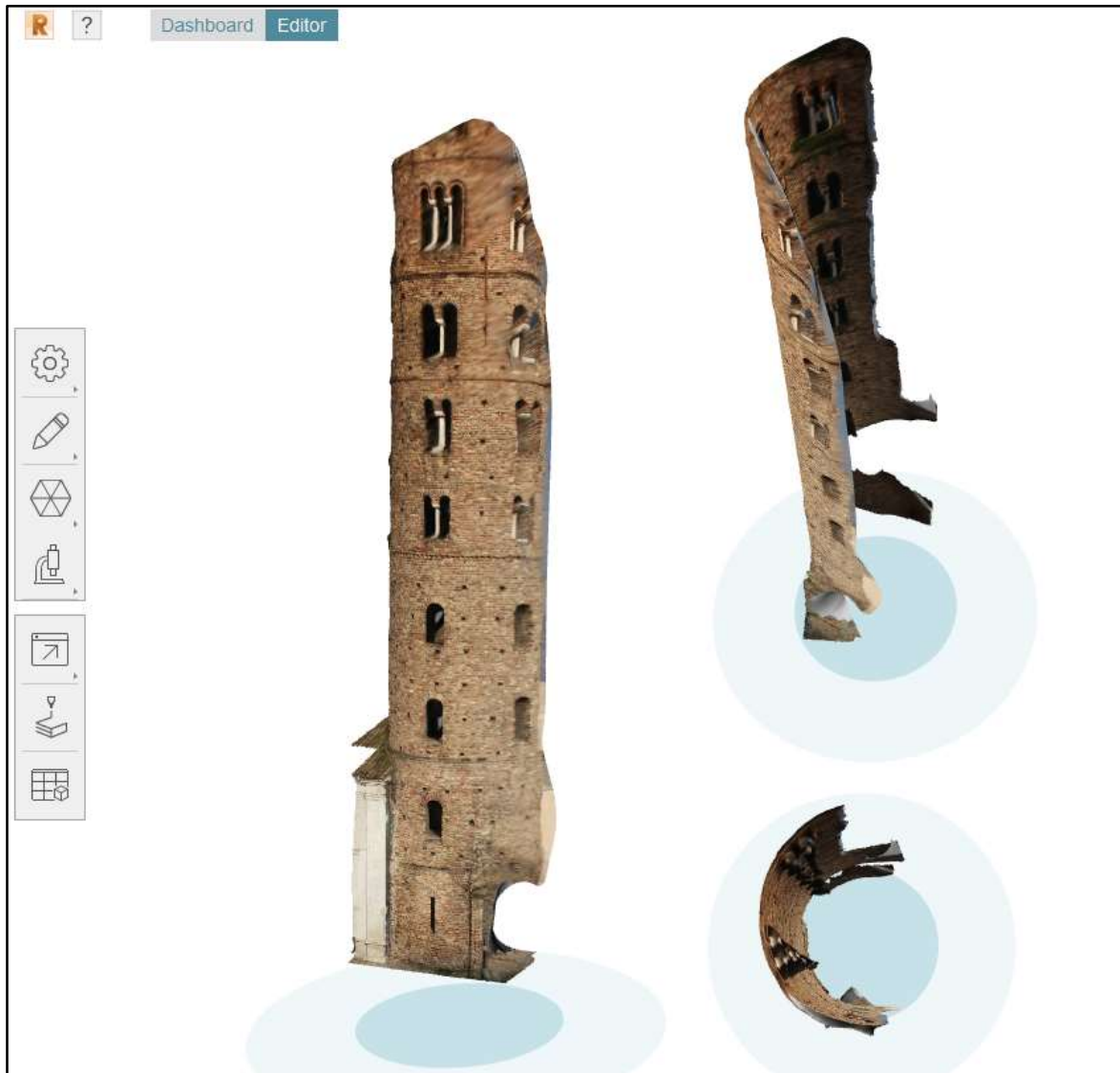


Figura 114: Mesh incompleta del campanile di Sant'Apollinare Nuovo

CAPITOLO 6

Conclusioni e sviluppi futuri

6.1 Conclusioni

In questa tesi si è mostrata l'efficacia di una procedura in grado di importare in ambiente FEM un modello tridimensionale realizzato a partire da una nuvola di punti generata da un rilievo fotogrammetrico o da laser scanner (metodo CSF) confrontandolo con un secondo modello tridimensionale realizzato in ambiente BIM partendo dalla medesima nuvola di punti (metodo BIM).

Il primo passo è stato quello di studiare una struttura di piccole dimensioni, la fontanella del giardino pubblico "Villa Cassarini", in modo da poter formalizzare gli *step* principali delle due procedure; la prima procedura ideata consente di passare dalla nuvola di punti "Cloud" all'oggetto solido "Solid" al modello agli elementi finiti "Fem" e per questo motivo è stata chiamata "metodo CSF", mentre la seconda, che prevede di realizzare il modello della struttura con un software BIM è stata chiamata semplicemente "metodo BIM". Una volta dimostrata la fattibilità della procedura la si è validata andando a studiare l'Arco di Augusto di Rimini e confrontando i risultati ottenuti con le due procedure con quelli presenti in letteratura da altre tesi sulla medesima struttura, in particolare si è fatto riferimento al lavoro di Marco Succi "Un approccio speditivo per il rilievo, la modellazione numerica e l'analisi strutturale di edifici monumentali", A.A. 2015/2016 e Maurizio Serpieri "Rilevamento fotogrammetrico digitale non convenzionale ed analisi strutturale agli elementi finiti dell'Arco d'Augusto di Rimini", A.A. 2004/2005.

Sull'arco sono state eseguite due tipi di analisi, un'analisi lineare sotto peso proprio e un'analisi modale. Per quanto riguarda le analisi lineari si sono ottenuti risultati completamente compatibili tra i vari metodi con uno scostamento di circa 0.2 mm tra i modelli CSF e Cloud2Fem e di 0.1 mm tra i modelli BIM, Cad (Succi) e FEM (Serpieri).

Anche nelle analisi modali sono ottenuti risultati molto soddisfacenti dove le differenze percentuali delle frequenze naturali tra il metodo CSF e Cloud2Fem sono comprese tra lo 0.52% e il 4.19% mentre tali differenze risultano, come è intuibile, leggermente maggiori tra metodo CSF e metodo CAD.

Un risultato apparentemente contro intuitivo si è avuto confrontando le frequenze naturali del modello BIM con il modello CAD di Succi; nonostante le prime tre differenze percentuali siano sotto al 7.33% si sono ottenute differenze minori rispetto ai modelli generati dalla nuvola di punti. Il quarto modo di vibrare invece presenta una differenza tra il 30 e il 38%.

Si è fatto un confronto anche con le frequenze naturali ottenute dal modello FEM di Serpieri dove si sono riscontrate differenze percentuali maggiori, ma questo era prevedibile in quanto quest'ultimo modello è bidimensionale invece che tridimensionale come i precedenti e inoltre non considera la presenza delle murature a sacco in appoggio ai piedritti dell'arco che comportano un benefico irrigidimento.

Si è fatto infine un confronto tra le tensioni normali del modello CSF e BIM con quelle ottenute dal modello FEM di Serpieri. Nel primo caso si ha una differenza delle σ_{xx} di circa 1.10 kg/cm^2 mentre nel secondo una differenza σ_{xx} di 1.28 kg/cm^2 . In entrambe i modelli le σ_{zz} medie sono dell'ordine di 10^{-2} kg/cm^2 .

Si può quindi concludere che le procedure adottate siano efficaci e presentino il grande vantaggio di ottenere modelli più accurati rispetto alla metodologia tradizionale utilizzando un numero di informazioni geometriche estremamente maggiore e trovando applicabilità sia nel rilievo di strutture semplici, consentendo un risparmio in termini di tempo, che nel caso di strutture fortemente irregolari come gli edifici e i monumenti storici normalmente modellizzati con forti approssimazioni. La modellizzazione da nuvola di punti permette inoltre lo studio della stabilità e conservazione di opere d'arte come ad esempio le statue che fino ad ora erano difficilmente rappresentabili in software FEM.

6.2 Sviluppi futuri

I prossimi passi della ricerca possono essere volti ad una maggiore automazione del metodo CSF in modo da richiedere un intervento minore dell'operatore e ottenere dei vantaggi in termini di tempi, che in ogni caso risultano già contenuti rispetto ai metodi di rilievo tradizionali.

Dato l'alto livello di dettaglio ottenibile dalla nuvola di punti si ritiene plausibile utilizzare questa procedura in campo diagnostico confrontando più superfici ricavate da *cloud* realizzate in tempi differenti, in questo modo si potrebbe monitorare l'evolversi di fessurazioni, cedimenti e spostamenti dell'intera struttura rispetto ai metodi attuali che prevedono un monitoraggio puntuale a mezzo di strumenti quali estensimetri e inclinometri. Analogamente sarebbe possibile rilevare e monitorare frane e pendii in ambiente FEM attraverso il software Flac3D.

Lo studio della vulnerabilità sismica di monumenti ed edifici storici è di grande interesse inoltre la possibilità di disporre di un metodo, anche approssimato, per ottenere un'analisi FEM economica e in tempi rapidi può tornare utile in seguito ad eventi sismici dove è richiesto di garantire l'effettiva efficienza di edifici strategici e luoghi sensibili nel minor tempo possibile. In generale si può ottenere una classifica degli edifici secondo il loro grado di vulnerabilità ed importanza in modo da ottimizzare gli stanziamenti di fondi per migliorarne la risposta sismica. In modo analogo si potrebbe realizzare una mappa di vulnerabilità sismica per monumenti, edifici storici, fontane, ponti etc. con particolare interesse per le statue attualmente difficilmente analizzabili con modelli FEM.

Per quanto riguarda l'Arco di Augusto si potrebbe svolgere un'analisi di *Pushover*, si tratta di una procedura statica non lineare utilizzata per studiare il comportamento di una struttura a fronte di un'azione, che può essere una forza o uno spostamento e prevede di "spingere" la struttura andando ad applicare in modo incrementale monotono un profilo di forze (o spostamenti) fino al collasso o al raggiungimento di un valore limite prefissato.

Analogamente si può passare ad analisi dinamiche non lineari di tipo "*time-history*" con accelerogrammi naturali spettrocompatibili con la sismicità della zona per comprendere l'effettivo grado di vulnerabilità sismica del monumento con la conseguente propagazione delle fessure e rotture ottenibili dall'evento sismico di progetto fornito dalla normativa vigente.

Si ritiene che questa procedura possa essere sperimentata nello studio di strutture a telaio in acciaio a vista in modo da estrapolare informazioni riguardo alla posizione e dimensione dei profili in acciaio andando a realizzare un file vettoriale dal quale ottenere gli assi del telaio in modo da poter eseguire analisi sia statiche che dinamiche anche in caso di assenza di progetti e misure riuscendo così a contenere i costi che in alternativa sarebbero molto elevati.

Anche in campo medico si potrebbero ottenere risultati interessanti per quanto riguarda l'ottimizzazione della realizzazione di protesi partendo da una TAC 3D di ossa e andando a studiare gli stati tensionali che differiscono in ogni soggetto in quanto determinati da variabili quali il peso, la struttura fisica, la postura etc.

Indice Analitico

A

Associazione Italiana Software Tecnico "AIST" · 29
Authoring Software · 26

B

BIM 3D · 23
BIM 4D · 24
BIM 5D · 24
BIM 6D · 24
BIM 7D · 24
BIM Authoring · 26
BIM Manager · 21
BIM Tools · 26
BIM, acronimo di *Building Information Model* · 26
BIM, acronimo di *building information modeling* · 18
BuildingSmart · 29
Bundler · 68

C

CAFM · 25
Centro di proiezione matematico Om · 34
Centro di Proiezione O · 32
Centro fiduciale FC · 36
clash detection · 27
Cloud2Fem · 113
COBie – Construction Operations Building information exchange · 25
code checking · 27
Correlazione ai Minimi Quadrati · 62
Correlazione Area Based · 60

D

digital number · 37
Digitizing · 36
Distanza focale c · 31
Distanza principale ottica S' · 34
Distanza principale $S'm$ · 34
distorsione ottica $\Delta\rho$ · 34

E

Equazioni di collinearità · 31

F

Facility Manager · 25
Famiglia Caricabile in Revit · 78
Famiglia di Revit · 78
Famiglia di Sistema in Revit · 78
Famiglia Locale in Revit · 78
Feature Based Matching (FBM) · 64
Finestra di correlazione · 60
Fotogrammetria · 31

G

Geomatica · 31
ground sampling distance GSD · 39

I

IFC Industry Foundation Classes · 29
image matching · 36
image patch · 60
immagine sagoma · 60
Istanza in Revit · 78

K

kd-tree procedure · 67

L

Laser a tempo di volo TOF · 73
Laser a triangolazione · 70
Least Square Matching (LSM) · *Vedi* Correlazione ai Minimi Quadrati
Level Of Development – LOD (livello di sviluppo) · 21

M

Matching Relazionale · *Vedi* Relation Matching
Matching window · 60
Matrice di ricerca · 60
Metodo della Correlazione Vertical Line Locus · 58
Metodo dell'approccio gerarchico · 59
Metodo delle linee epipolari · 53
Modalità tavolozza · 38
Modalità True Color RGB · 37
model checking · 27

N

NURBS · 76

O

OBS – Organization Breackdown Structures · 24
Operatore SIFT Scale Invariant Feature Trasform · 66

P

Parametri di Orientamento Esterno P.O.E. · 32
Parametri di Orientamento Interno P.O.I. · 32
Parametro flatness · 62
Pche viene ottenuto arametro di schiacciamneto α · 62
Processing Software · 26
Punto principale di auto collimazione PPA · 34
Punto principale di simmetria PBS · 36
Pupilla di entrata EP · 34
Pupilla di uscita EP' · 34

R

Raggio principale PRa · 34
RAM – Respondability Assignement Matrix · 24
Relation Matching (RM) · 65
Reviewing Software · 26

S

Search window · 60
Sensori a lama di luce laser · 72
Sensori a luce strutturata · 72
Sensori a tempo di volo · 73
Sensori spot laser · 70
SURF Speeded Up Robust Features · 66

T

Tipo in Revit · 78

V

Voxel · 113

W

WBS – Work Breackdown Structures · 24

Bibliografia

- [1] “UBI MULTI PECCATORES OCCURRUNT... Storia ed archeologia della chiesa di S. Apollinare Nuovo, del monastero benedettino, poi convento dei Frati Minori Osservanti, e del quartiere ritenuto l’area palaziale della Ravenna tardoantica” a cura di Paola Novara - Danilo Montanari Editore.
- [2] “I CAMPANILI DI RAVENNA – STORIA E RESTAURI”
G. Battistini, L. Bissi, L. Rocchi – Longo Editore
- [3] Il Building Information Modeling – BIM
Valore, gestione e soluzioni operative, Caputi, Odorizzi, Stefani,
Maggioli Editore
- [4] Appunti di Fotogrammetria, Prof. Antonio Zanutta
- [5] Introduzione alla Fotogrammetria Digitale, Prof. Antonio Zanutta
- [6] “Il rilievo fotogrammetrico dell’Arco di Augusto mediante camere amatoriali e software low-cost”, Anna Calarota, A.A. 2014/2015
- [7] Rilievo con laser scanner, Laboratorio di fotogrammetria CIRCE,
Università Iuav di Venezia
- [8] “Un approccio speditivo per il rilievo, la modellazione numerica e l’analisi strutturale di edifici monumentali”, tesi di Laurea specialistica in Ingegneria Civile, Marco Succi, Università degli Studi di Bologna, A.A. 2015/2016
- [9] “Rilevamento fotogrammetrico digitale non convenzionale ed analisi strutturale agli elementi finiti dell’Arco d’Augusto di Rimini”, tesi di Laurea triennale in Ingegneria Civile, Maurizio Serpieri, Università degli Studi di Bologna, A.A. 2004/2005
<http://amslaurea.unibo.it/7394/>

- [10] Castellazzi G., D’Altri A. M., de Miranda S., Ubertini F. An innovative numerical modeling strategy for the structural analysis of historical monumental buildings. *Engineering Structures* 132 (2017) 229-248.
- [11] Castellazzi G., D’Altri A. M., De Miranda S., Ubertini F., Bitelli G., Lambertini A., Selvaggi I., Tralli A. A mesh generation method for historical monumental buildings: an innovative approach. *ECCOMAS Congress 2016, VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, G. Stefanou, V. Plevris (eds.), Crete Island, Greece, 5-10 June 2016.
- [12] Bitelli G., Castellazzi G., D’Altri A. M., De Miranda S., Lambertini A., Selvaggi I. Automated voxel model from point clouds for structural analysis of cultural heritage. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B5, 2016, XXIII ISPRS Congress, 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic.
- [13] Castellazzi G., D’Altri A. M., Bitelli G., Selvaggi I., Lambertini A. From Laser Scanning to Finite Element Analysis of Complex Buildings by Using a Semi-Automatic Procedure. *Sensors* 2015, 15, 18360-18380.
- “Analisi di pushover 3D per strutture in c.a.”, tesi di Laurea specialistica in Ingegneria Civile, Maurizio Serpieri, Università degli studi di Bologna, A.A. 2006/2007
- Confronto tra modellazioni a plasticità diffusa e concentrata per strutture in c.a.: la scuola di Bisignano. Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile, Fausto Viesi, Università degli studi di Bologna, A.A. 2007/2008
<http://amslaurea.unibo.it/405/>
- [Mazza, 2008]: Daniele Mazza, Validazione di una metodologia di pushover 3d per strutture intelaiate in c.a. Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile, Università degli studi di Bologna, A.A. 2007/2008
<http://amslaurea.unibo.it/178/>

- “Analisi pushover tridimensionali di strutture in c.a. irregolari in pianta”, tesi di Laurea specialistica in Ingegneria Civile, Mattia Mignardi, Università degli studi di Bologna, A.A. 2010/2011

<http://amslaurea.unibo.it/111/>

<http://www.cspfea.net/scheda-documento-CSP00245.html>

- Ferracuti B., Pinho R., Savoia M., Serpieri M., SEISMIC ANALYSIS OF IRREGULAR RC STRUCTURES BY 3D FORCE/TORQUE PUSHOVER METHOD, in: Valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica di edifici esistenti in cemento armato, MILANO, Cosenza E., Manfredi G., Monti G., 2008, pp. 315 - 322 (atti di: Valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica di edifici esistenti in cemento armato, Roma, 29-30 Maggio 2008) [atti di convegno-relazione]
- Ferracuti B., Savoia M., Pinho R., 3D Pushover Methods for Irregular RC Structures, in: Proceeding of Fifth European Workshop on the seismic behavior of Irregular and Complex Structures, s.l, s.n, 2008, pp. 1 - 12 (atti di: Fifth European Workshop on the seismic behavior of Irregular and Complex Structures, Catania - Italy, 16-17 September 2008) [atti di convegno-relazione]
- Ferracuti B., Savoia M., Pinho R., FORCE/TORQUE PUSHOVER METHOD FOR PLAN IRREGULAR STRUCTURES, in: Non Linear Static Methods for Design/Assessment of 3D Structures, s.l, Bento R., Pinho R., 2008, pp. 1 - 16 (atti di: Non Linear Static Methods for Design/Assessment of 3D Structures, Lisbon - Portugal, 5-6 May 2008) [atti di convegno-relazione]
- Ferracuti B., Savoia M., Pinho R., 3D Pushover Analysis for Evaluating Torsional Effect of RC Structures, in: XIII Convegno ANIDIS 2009- L’Ingegneria Sismica in Italia, GALAZZANO, IMREADY, 2009, pp. 1 - 10 (atti di: XIII Convegno ANIDIS 2009- L’Ingegneria Sismica in Italia, Bologna, 28 giugno -2 luglio) [atti di convegno-relazione]

Sitografia

- L'Opus sectile https://it.wikipedia.org/wiki/Opus_sectile
- [S.2] COCCIOPESTO <https://it.wikipedia.org/wiki/Cocciopesto>
- [S.3] FRUSTOLI
http://dizionari.corriere.it/dizionario_italiano/F/frustolo.shtml
- [S.4] ARCO DI AUGUSTO,
[https://it.wikipedia.org/wiki/Arco_di_Augusto_\(Rimini\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Arco_di_Augusto_(Rimini))
<http://www.hotelrimini.me/monumenti-rimini/arco-d-augusto-di-rimini.php>
<http://www.rimini-it.it/arco-augusto.htm>
- [S.5] GAIO GIULIO CESARE OTTAVIANO AUGUSTO
<https://it.wikipedia.org/wiki/Augusto>
- [S.6] GIARDINI DI VILLA CASSARINI
http://www.bo.cna.it/bolognaccoglie/giardini_di_villa_cassarini
- [S.7] PELLICOLA FOTOGRAFICA
https://it.wikipedia.org/wiki/Pellicola_fotografica
- [S.8] STRUCTURE FROM MOTION
https://it.wikipedia.org/wiki/Structure_from_motion
- [S.9] INTRODUZIONE A RHINOCEROS
http://www.apogeeonline.com/2008/libri/9788850325214/ebook/pdf/2521_introduzione.pdf
- [S.10] INTRODUZIONE A RAPIDFORM XOR3
<http://www.unocad.it/cms/index.php/rapidform/xor-redesign>
- [S.11] AUTODESK REMAKE
<http://remake.autodesk.com/about>
<http://garr8.altervista.org/grafica/modellazione-3d/autodesk-remake/autodesk-remake-rilasciato/>

- [S.12] REVIT: DIFFERENZE TRA FAMIGLIE, TIPI ED ISTANZE
<http://www.grafica2d3d.com/2010/11/revit-differenze-tra-famiglie-tipi-ed-istanze.html>

- [S.13] DEFINIZIONE DI CURVE NURBS
<https://it.wikipedia.org/wiki/NURBS>

Allegati

Immagini Fontanella

















Immagini Arco di Augusto









Immagini Campanile di Sant'Apollinare Nuovo





Ringraziamenti

Finalmente l'ultima pagina di questa mia, un po' troppo lunga, esperienza studentesca.

Il ringraziamento più grande va sicuramente ai miei genitori, sempre presenti, disponibili, premurosi e pazienti. Hanno aspettato con impazienza questo momento credendo in me e appoggiandomi anche quando le situazioni non erano rosee, accettando le mie scelte e sostenendomi sempre. Non potrò mai ringraziarli abbastanza per tutti i sacrifici che hanno fatto.

Un ringraziamento va a tutta la mia famiglia che da nord a sud non mi ha mai fatto mancare il sostegno ed ha aspettato con me questo giorno.

Parecchi sono gli amici che in questi anni sono stati al mio fianco alternando momenti di studio, di confronto e di divertimento. Ognuno di voi ha fatto tanto, aiutandomi quando i miei appunti erano da cestinare, ascoltandomi quando avevo bisogno di parlare, sfottendomi quando mi stavo impuntando inutilmente su qualcosa e soprattutto trascinandomi fuori quando avevo bisogno di staccare la spina. Franz, Giò, Benny, Paoletta, Ale, Matte, Kle, Monga, Mancio, Stefanino, Somma, Dario, Zampa, Roso, Roby, Teo, Dani, Kri, Rita, Ana se non sono del tutto matto è merito vostro. Ci sono poi le mie supporter Laura, Eli e Anto che non hanno mai smesso di fare il tifo per me!

Una dedica va a tutto il laboratorio di topografia in particolare a Chiara, Alessandra, Valentina, Mirko e Pino, dove ho trovato persone estremamente competenti e soprattutto un bellissimo clima che mi ha fatto sentire parte di un gruppo.

Infine un doveroso ringraziamento al prof. Zanutta che mi ha dato la possibilità di dedicarmi a questa tesi che mi ha interessato fin da subito lasciandomi ampia libertà di lavoro e incoraggiandomi quando ogni strada sembrava senza uscita.