Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

Fotogrammetria e scansioni 3D per rilievi strutturali

Progetto SUSA – SMART URBAN SUSTAINABLE AREA

Webinar, 21 Aprile 2021

Marialuisa Mongelli / TERIN-ICT-HPC

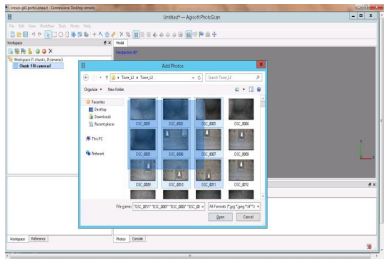
Principali argomenti

1. Introduzione alla fotogrammetria
2. Il processo fotogrammetrico
3. L'infrastruttura di calcolo ICT dell' ENEA per i Beni Culturali
4. I laboratori virtuali
5. La catena di modellazione: dalla fotogrammetria all'analisi FE
6. Approccio Integrato: fotogrammetria-sensori FBG
7. Dimostratore
8. Conclusioni

Introduzione alla fotogrammetria

Cos'è la fotogrammetria?

- E' una tecnica di rilievo 3D alternativa alla topografia tradizionale
  - Obiettivo: realizzare una copia digitale tridimensionale "Digital Twin" a partire da immagini fotografiche bidimensionali.
  - Finalità: studio, restauro, conservazione, protezione, valorizzazione, fruizione
- Campi di applicazione:
  - Architettura
  - Ingegneria
  - Archeologia
  - Beni Culturali
  - Geologia
  - Scena del crimine e incidentistica



Cosa serve?

- Una fotocamera, un metro, un computer, un software

Introduzione alla fotogrammetria

Perché la fotogrammetria?

- E’ il metodo più rapido per poter effettuare un rilievo.
- E’ una tecnologia non distruttiva, non invasiva, economica, senza contatto.
- Può essere applicata anche in condizioni ambientali sfavorevoli.
- Restituisce un modello 3D con informazioni metriche precise e buona qualità dell’aspetto cromatico
- Applicabile sia su superfici estese (complessi architettonici) che su piccoli oggetti (statue, quadri, affreschi…)
- Elaborazione delle immagini automatica o semi automatica con software commerciali, gratuiti e “open source”.
- Utile per costituire una banca dati implementabile, utile per successive valutazioni nel tempo

Introduzione alla fotogrammetria

Definizione FOTOGRAMMETRIA:

tecnica di rilievo che consente di fissare posizione, forma e dimensioni degli oggetti sul terreno, utilizzando le informazioni contenute in opportune immagini fotografiche degli stessi oggetti, riprese da punti diversi

La fotogrammetria viene classificata in base a:

- tipo di presa utilizzata
- tipo di elaborazione
- tipo di fotografia utilizzata

Tipo di presa	Tipo di elaborazione	Tipo di fotografia
Fotogrammetria terrestre Le prese avvengono da *terra*; in questo caso gli oggetti si trovano a distanze inferiori a 200 m; per cui si parla anche di *fotogrammetria dei vicini* (rilievo di *edifici*)	**Fotogrammetria analogica** La ricostruzione degli oggetti rilevati si ottiene con *dispositivi fisici* (bacchette metalliche, raggi luminosi) che riproducono all'*inverso* il fenomeno della presa	**Fotogrammetria classica** Le fotografie sono ottenute dallo *sviluppo* di emulsioni fotosensibili su *pellicola*, o su *lastre* di vetro (in negativo e in positivo)
Fotogrammetria aerea Le prese avvengono da un *aereo*; in questo caso il terreno si trova a distanze superiori a 200 m; per cui si parla anche di *fotogrammetria dei lontani* (rilievo del *territorio*)	**Fotogrammetria analitica** La ricostruzione degli oggetti rilevati si ottiene elaborando numericamente (con moderni strumenti di calcolo) opportune *misure* effettuate direttamente sui fotogrammi	**Fotogrammetria digitale** Le fotografie sono ottenute sotto forma *numerica* e organizzate in un grigliato di pixel. Possono essere ottenute sia da una *macchina digitale*, sia per *scansione* di una fotografia tradizionale

La fotogrammetrie si basa sul principio della visione stereoscopica: la visione dell'oggetto da due punti di vista

Introduzione alla fotogrammetria

Tipo di presa => Fotogrammetria terrestre (close-range)

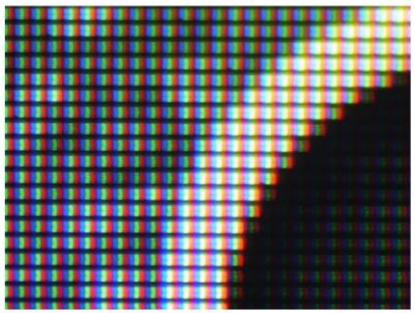
- Distanza inferiore ai 200mt

Tipo di elaborazione => Fotogrammetria analitica

- Elaborazioni numeriche con strumenti di calcolo moderni (software)

Tipo di fotografia => Fotogrammetria digitale

- Le fotografie sono ottenute sotto forma numerica ed organizzate in modo da comporre un griglia fissa rettangolare (pixel)

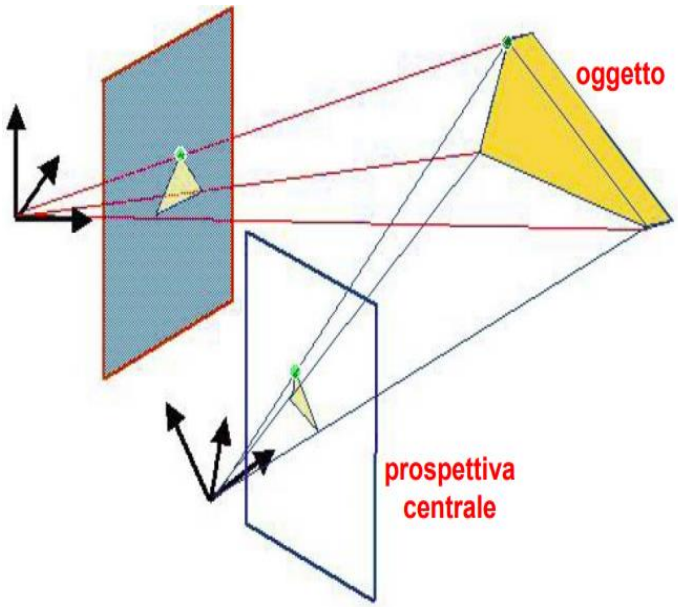


La risoluzione dell'immagine è descritta in PPI (pixel per pollice)

Introduzione alla fotogrammetria

Fotogrammetria terrestre o close-range

- Approccio monoscopico => 1 immagine (raddrizzamento di singoli fotogrammi da cui si ricava una proiezione ortogonale di tipo 2D , parallela alla superficie inquadrata)
- Approccio steroescopico => visione dell'oggetto 3D a partire da due punti di vista
- Approccio multi-immagine => restituzione 3D con più immagini riprese da posizioni differenti



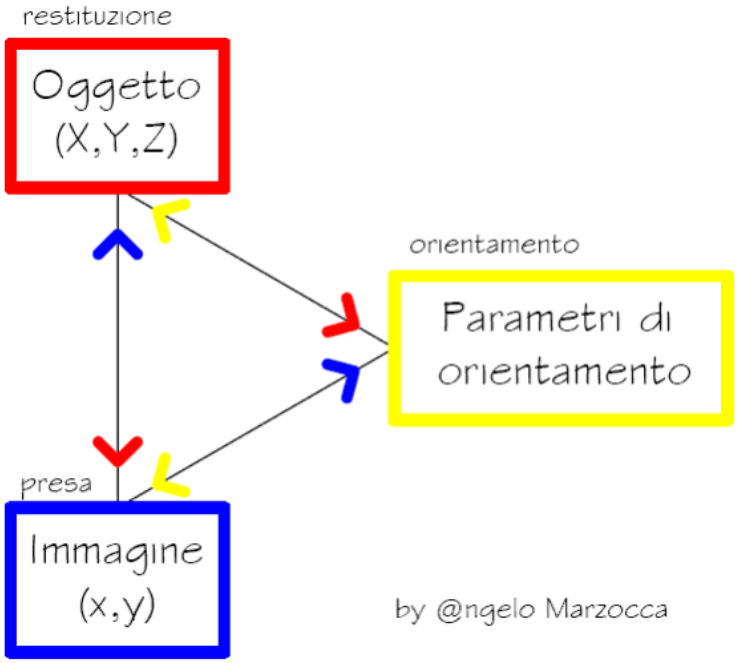
Utilizzando due prospettive centrali di uno stesso punto oggetto è possibile ricostruire la posizione spaziale

Il processo fotogrammetrico

Fotogrammetria digitale

- consiste nell'elaborazione del modello 3D partendo da immagini 2D
- Approccio multi-immagine
- Da un set di immagini digitali 2D, (ottenute con una comune macchina fotografica o con uno smartphone) che vengono elaborate dal software, si estraggono dati tridimensionali.
- Tecnica di elaborazione "Structure from Motion":
  - Basata su algoritmi di Computer Vision, la SfM estrae i punti notevoli dalle singole foto, li incrocia, trovandone le coordinate nello spazio.
  - Per poter ricostruire la tridimensionalità di una scena è necessario ricostruire la posizione di scatto delle singole fotografie, la cosiddetta geometria di presa.

Il processo fotogrammetrico



3 Sistemi

Presa, dall'oggetto nello spazio (X,Y,Z) e con una macchina di parametri noti si giunge alla definizione dell'immagine (x,y);

Orientamento, dall'oggetto nello spazio (X,Y,Z) e dall'immagine (x,y) si determinano i parametri dell'orientamento;

Restituzione,dall'immagine (x,y) e dai parametri dell'orientamento si ricavano le coordinate spaziali dell'oggetto (X,Y,Z).

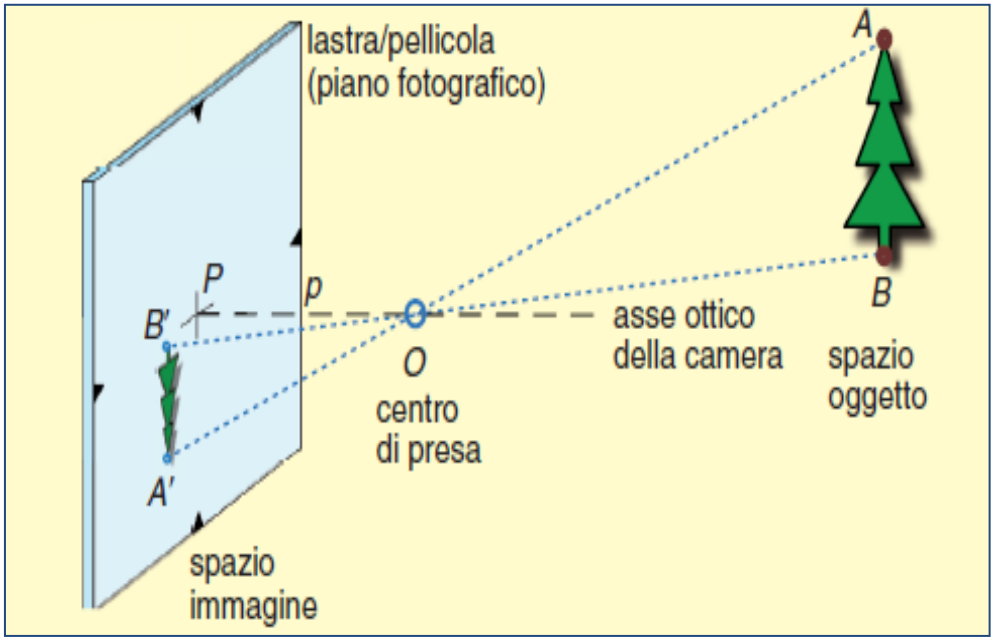
Definire la relazione (**proiettività)** che lega in modo univoco:

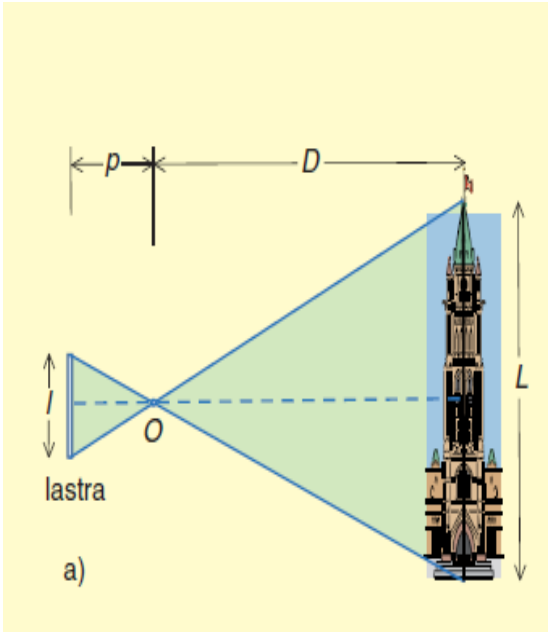
- i punti P (X,Y,Z) dello spazio oggetto 3D
- I punti p (x,y) dello spazio immagine 2D
- I parametri di orientamento (funzione della presa fotografica)

Il processo fotogrammetrico

DEFINIZIONI:

- **Centro di presa O**: punto dell'obiettivo della camera
- **Distanza principale (p):** distanza di O dal piano della lastra p = distanza focale dell'obiettivo
- **Punto principale (P)**: punto di proiezione di O sul piano della lastra





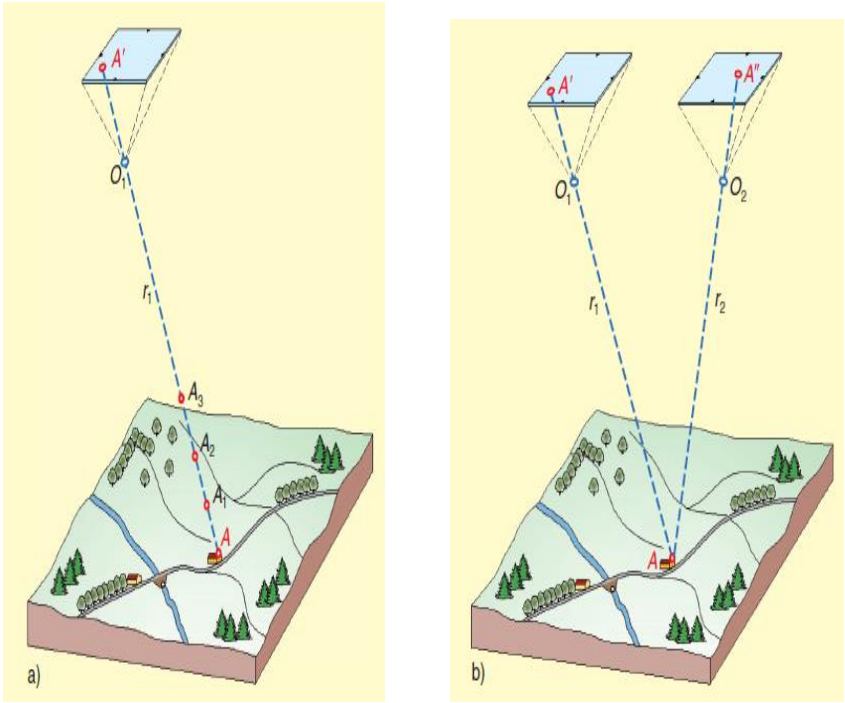
PO = p

Il processo fotogrammetrico

- Una sola immagine nel piano (come quella della fotografia) non contiene informazioni sufficienti a definire la posizione e le dimensioni di un oggetto tridimensionale
- Sono necessarie almeno **due immagini** che riprendono lo **stesso oggetto** (due punti di ripresa fotografici), **osservato da due differenti punti di presa *O1 e O2***

- Da ogni punto dello spazio oggetto (definito da tre coordinate) è possibile determinare il relativo punto immagine (in due cordinate)

- **Dallo spazio immagine non esiste una soluzione univocamente determinata**, ma una infinità di soluzioni, ottenute fissando un valore arbitrario ad una delle tre coordinate spaziali.



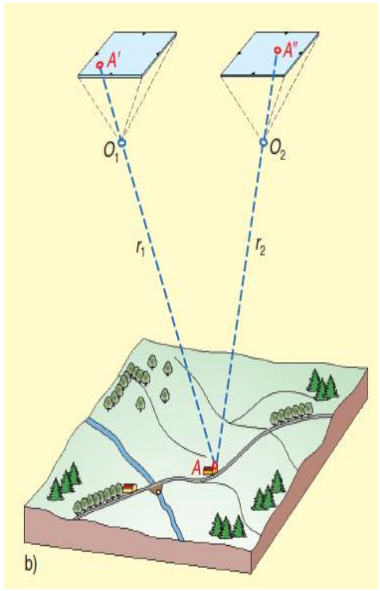
Il processo fotogrammetrico

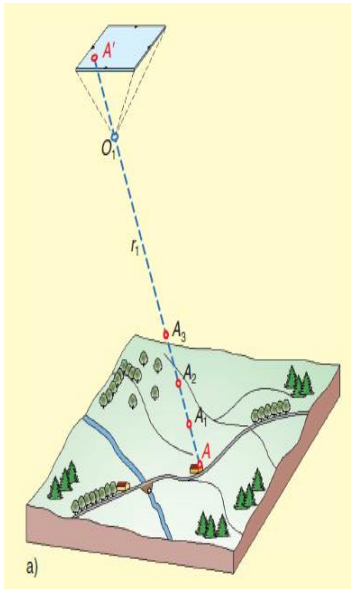
Corrispondenza tra punto A e:

- punto A' sulla 1° immagine
- punto A'' sulla 2° immagine

Il punto A è geometricamente definito se sono noti:

- posizione dei punti A' e A'' sulle 2 immagini
- posizione delle due lastre (note dalle immagini)
- posizione punti di presa O1 e O2 (note dalle immagini)





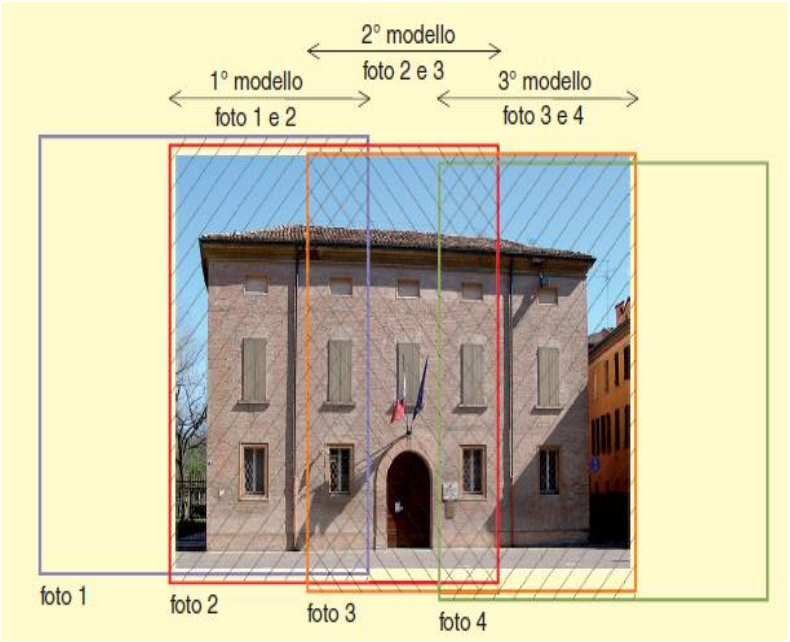
A = punto di intersezione dei due raggi proiettanti r1 e r2 che congiungono i due punti omologhi con i centri di presa corrispondenti

Le rette r1 e r2 rappresentano il sistema di equazioni di "COLLINEARITA' ottenute da relazioni di geometria analitica (fotogrammetria analitica)

Il processo fotogrammetrico

Le fasi del rilievo fotogrammetrico

- ACQUISIZIONE: operazioni riguardanti la presa delle immagini fotografiche (scansione fotogrammetrica), effettuate con opportune macchine fotografiche, dette camere, e opportune tecniche;
- ORIENTAMENTO: nella quale si posizionano le prese fotografiche e si risale al loro orientamento
- RESTITUZIONE: operazioni che consentono di effettuare misure sul modello 3D dell'oggetto ricostruito, utilizzando software specifici



OSSERVAZIONE: Affinché gli stessi punti dell'oggetto siano ripresi in **due fotogrammi consecutivi,** è necessario che questi presentino **un'area (detta di sovrapposizione)** in cui **entrambi contengano la stessa porzione di oggetto.**

Principale svantaggio: richiesta di notevoli risorse hardware e software per l'elaborazione delle immagini

L'infrastruttura di calcolo ICT dell' ENEA per i Beni Culturali

ENEAGRID: infrastruttura informatica che collega l'insieme dei numerosi centri di calcolo ENEA distribuiti in tutta Italia ed interconnessi tra loro da una rete ad alta banda.

- Ambiente unificato per l'accesso omogeneo alle risorse hardware e software messe a disposizione per i ricercatori ENEA e per i loro collaboratori;
- Utilizzo ottimizzato delle risorse;
- Sistemi multi-piattaforma per il calcolo numerico ad alte prestazioni.

L'infrastruttura di calcolo ICT dell' ENEA per i Beni Culturali

CRESCO6 Infrastructure
(REsearch Computational center on COmplex System)

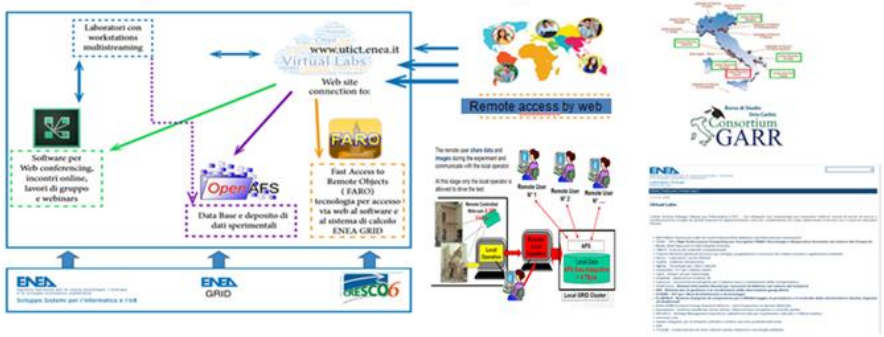
Computing power rating 1.4 PFLOPS
nodes: 434
cores: 20832

Each node
processors: 2xCPU Intel Xeon Platinum 8160 with 24 cores
clock: 2.1 GHz
memory: 192 GB (4 GB/core)

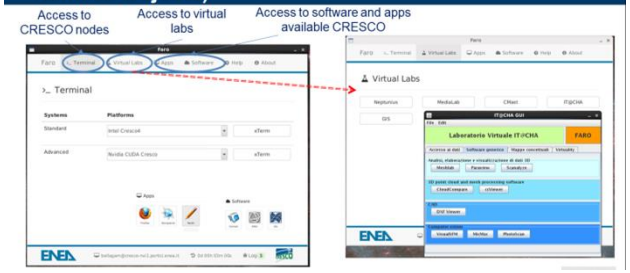
Network
Intel Omni-Path 15 switch with 46 ports
bandwidth: 100 Gb/s
latency: 100 ns

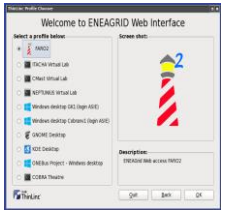
ENEA Virtual Labs

Virtual Labs => Open Labs
Networking of instrumentation and skills to support research and industry

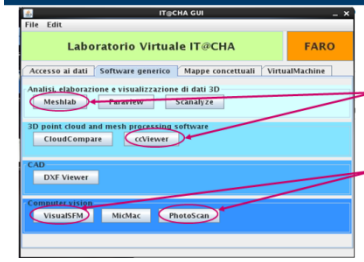


Graphic Interface named FARO2 (Fast Access to Remote Objects)



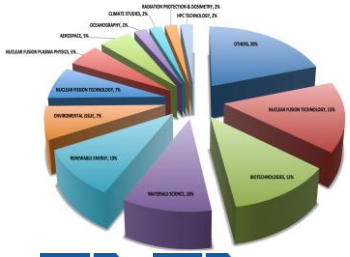


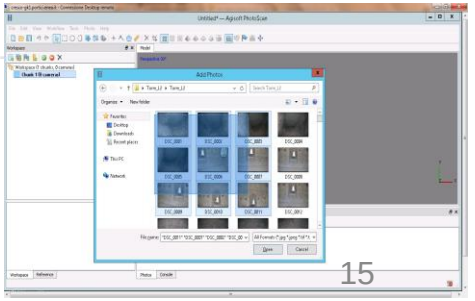
IT@CHA Virtual lab for Cultural Heritage



MESHLAB – CCVIEWER

PHOTO SCAN – VisualSFM





L'infrastruttura di calcolo ICT dell' ENEA per i Beni Culturali

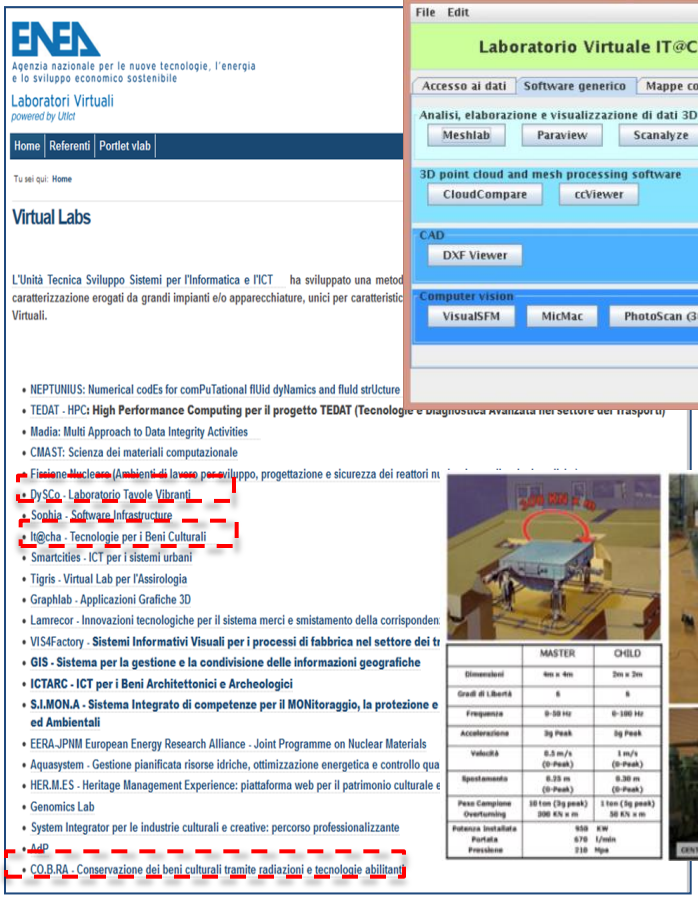
CRESCO: Centro computazionale di RicErca sui Sistemi Complessi

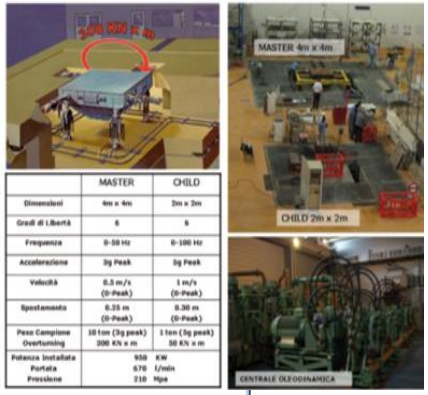
Accesso ai **LABORATORI VIRTUALI** dell'ENEA

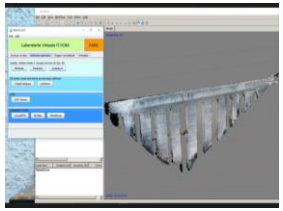
L'infrastruttura ICT ENEA per il patrimonio culturale

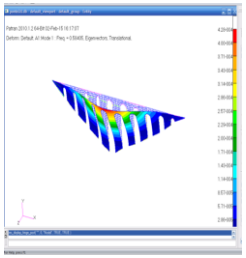
Virtual lab IT@CHA, CO.B.RA, DySCo, Tigris, Graphlab,ICTARC….

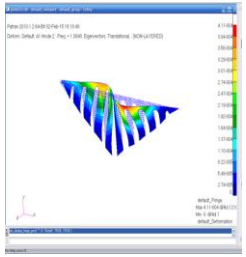
http://www.laboratorivirtuali.enea.it/it



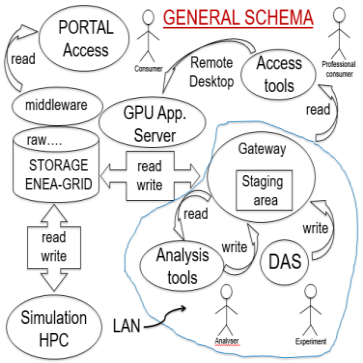




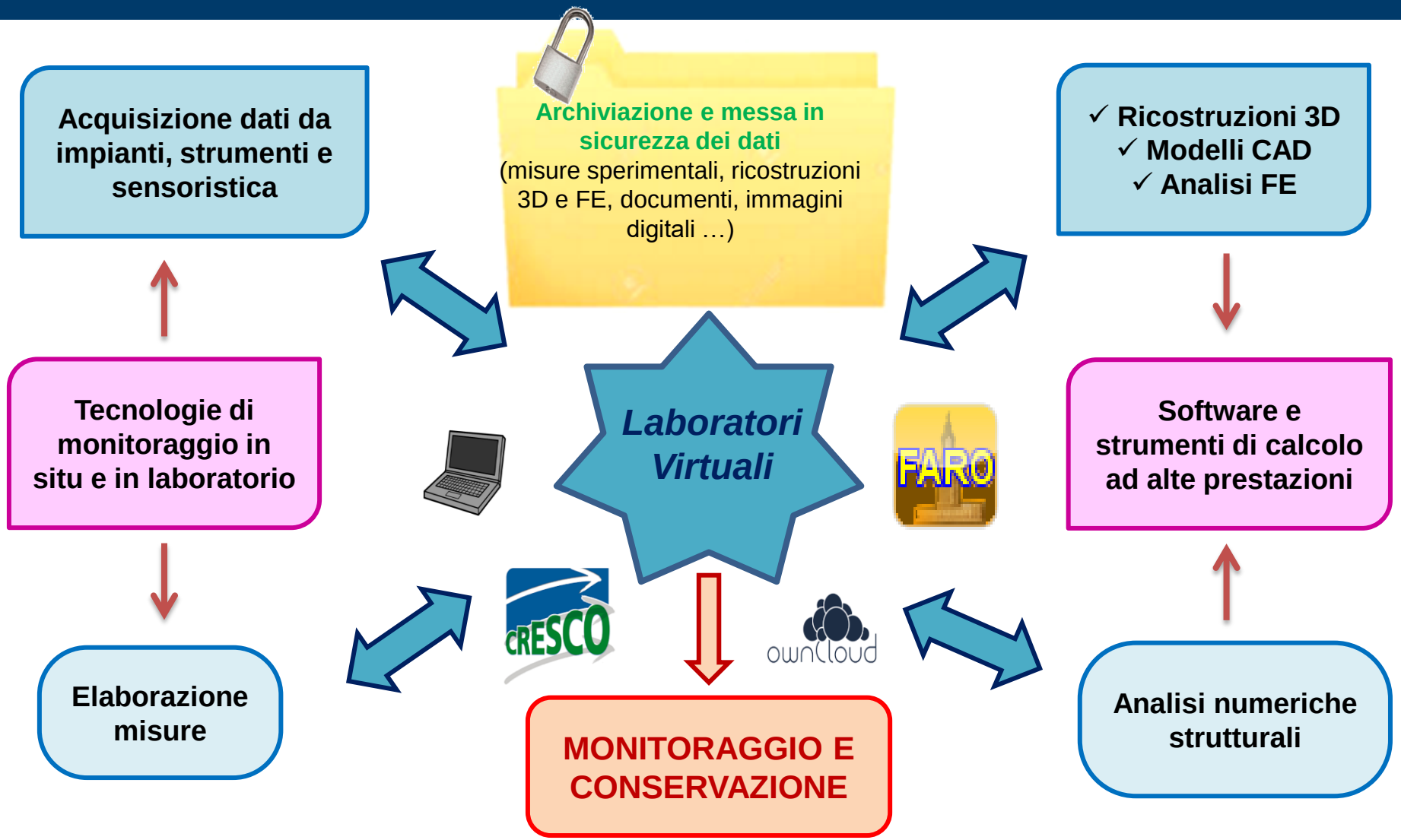




Architettura E3S

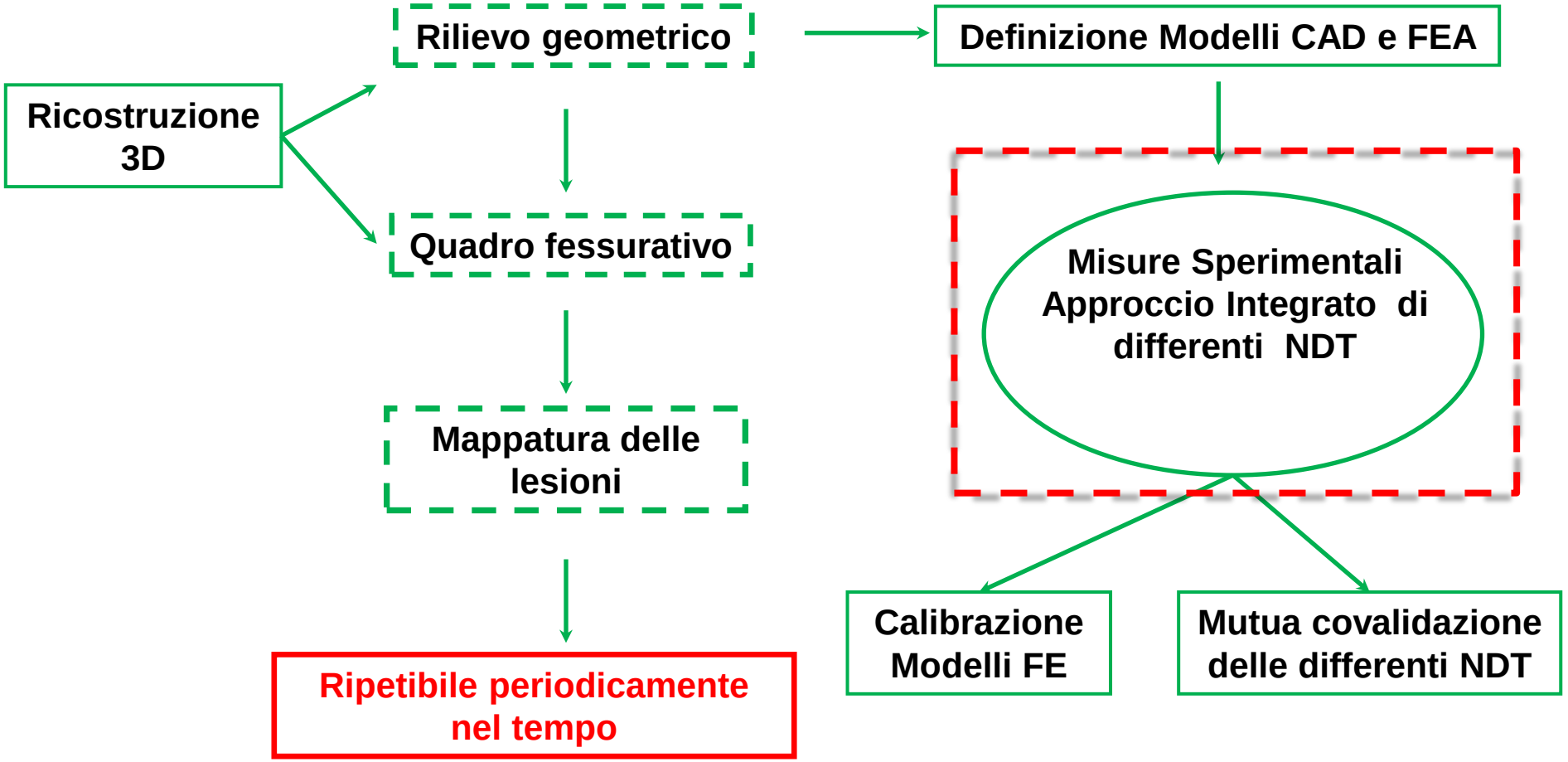


I laboratori virtuali



La Catena di modellazione via ENEAGRID: dalla fotogrammetria all'analisi FE

Approccio allo studio per l'analisi della possibile evoluzione del danno



Approccio integrato
Fotogrammetria - Sensori FBG

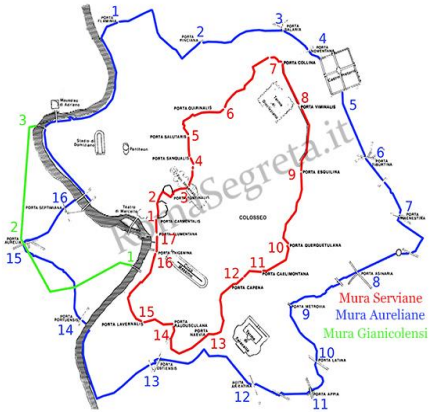
Monitoraggio delle lesioni: uso integrato di fotogrammetria e sensori FBG

- Fotogrammetria di SFM (Structure from Motion)
  - Controllo delle lesioni e monitoraggio periodico della loro possibile evoluzione
  - Acquisizione del rilievo geometrico
  - Definizione di modelli numerici (FEM / FEA) al fine di identificare le aree critiche da monitorare dove inserire la sensoristica per il monitoraggio (FBG).
- FBG (griglia di Bragg in fibra) per il monitoraggio permanente delle lesioni più significative.

Fotogrammetria e monitoraggio via FBG offrono vantaggi complementari che supportano la messa a punto di un sistema di monitoraggio veloce ed economico

Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

Obiettivo: monitoraggio e controllo dell'evoluzione del quadro fessurativo nel tempo - Torre L2



Prima cinta urbana

- nasce come difesa sacrale non militare (VI secolo A.C. -Servio Tullio)
- successivamente assume caratteristiche difensive (III secolo A.C.)
- fortezza inespugnabile con 383 torri, 7020 merli, 5 postierle principali, 2066 grandi finestre esterne (VI secolo)
- **19 km di estensione**
- caso studio: **macroelemento "torre L2** "accessibile da "Porta Appia", oggi nota come "Porta S. Sebastiano"

Porta San Sebastiano

Inquadratura Torre L2

Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

Monitoraggio delle lesioni: uso integrato di fotogrammetria e sensori FBG

- Eterogeneità della tessitura muraria
- Danni diffusi
- Alcune parti “collassate”
- Perdita di malta Infiltrazioni di umidità
- Sensibilità alle vibrazioni da traffico
- Lesioni importanti lungo le pareti est/ovest

Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

Descrizione dell' attività di ricerca: tecnologie

- ENEA, in collaborazione con la Direzione Interventi su Edilizia Monumentale della Sovrintendenza Capitolina, ha avviato una installazione idonea al **monitoraggio permanente del quadro fessurativo** su macroelementi strutturali delle Mura Aureliane di Roma.

- La applicazione utilizza fessurimentri basati su **tecnologia in fibra ottica FBG** (Fibre Bragg Grating) e la ricostruzione degli ambienti mediante **tecnologia fotogrammetrica 3D SfM** (Structural from Motion).

- Le due tecnologie messe in campo da ENEA offrono **vantaggi complementari** che possono favorire lo sviluppo di un sistema di monitoraggio che indirizzi gli interventi di recupero consentendo la **massima tempestività.**

Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

Descrizione dell' attività di ricerca: tecnologie

- La tecnologia dei **fessurimetri FBG** consente di **monitorare permanentemente**, in **regime statico e dinamico**, con alta risoluzione e con grande stabilità sul lungo termine, l'evoluzione locale delle fessure maggiormente significative:
  - grazie alla versatilità della tecnologia FBG, i fessurimetri sono associati a sensori FBG di temperatura e di umidità relativa, che consentono di correlare **l'evoluzione circadiana e stagionale dell'apertura delle fessure** alle condizioni ambientali ed alla eventuale imbibizione delle opere murarie a seguito delle **precipitazioni atmosferiche**.

- La tecnologia SfM consente, a partire da immagini digitali 2D:
  - di **acquisire la geometria** delle opere murarie per la definizione del modello agli elementi finiti **per l'analisi strutturale al fine di individuare le aree critiche delle strutture da monitorare**
  - di **rilevare periodicamente lo stato dei quadri fessurativi e la loro eventuale evoluzione**

Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

Descrizione dell' attività di ricerca: tecnologie

- La possibilità di collegare in serie i diversi **sensori FBG** risulta di grande vantaggio per **installazioni a prevalente sviluppo lineare**, **abbattendo i costi e la invasività del cablaggio**.

- La ricostruzione 3D fotogrammetrica da immagini digitali 2D mediante la **tecnologia SfM** offre il vantaggio di poter essere applicata con **apparecchiatura fotografica, di uso comune**, riuscendo comunque a generare **modelli numerici 3D geometricamente corretti**.

- **La disponibilità presso ENEA di infrastrutture di calcolo di grande potenza, quali le infrastrutture HPC** (High Performance Computing) **del sistema CRESCO** (Reasearch Computational Centre on Complex Systems), garantisce l' ottimale applicazione della tecnlogia SfM consentendo l'**elaborazione da remoto via web di un numero elevato di immagini ad alta risoluzione**.

Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

Restituzione 3D fotogrammetrica dalle immagini digitali 2D

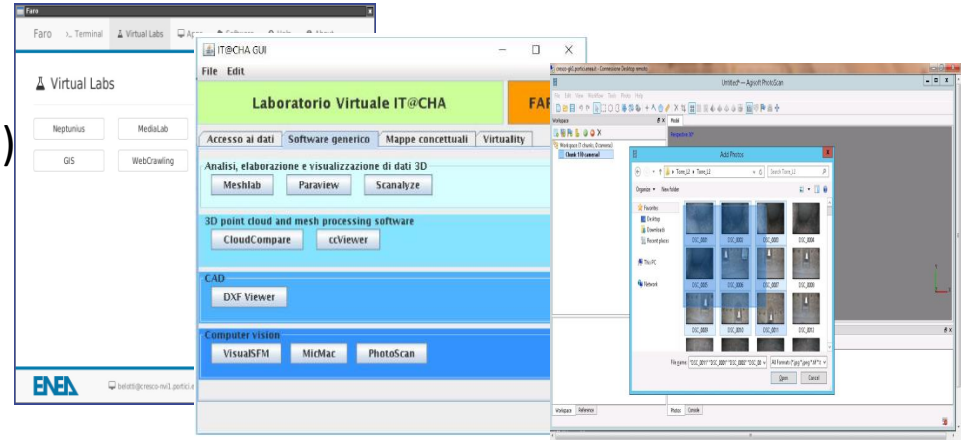
- Definire uno stato di riferimento "zero" per il controllo dell'evoluzione del quadro fessurativo nel tempo.
- Installazione di sensori FBG per il monitoraggio in continuo delle lesioni più importanti

Strumentazione:
Nikon D60, reflex digitale
risoluzione da 10,2 MP.
293 immagini 2D (5Mpx)
risoluzione pari a 3872 x 2592 pixel
distanza media di scatto circa 3 metri.

Software:
Photoscan Pro; Meshlab (restituzione 3D)
Autocad (definizione del quadro fessurativo)
Patran (pre-post FEM)
Nastran (FEA)

Obiettivi

Restituzione del:
- modello delle pareti EST ed OVEST;
- quadro fessurativo sulle due pareti
- modello globale della Torre L2 scalato geometricamente;
- modello FE preliminare



FARO: Fast Access to Remote Objects

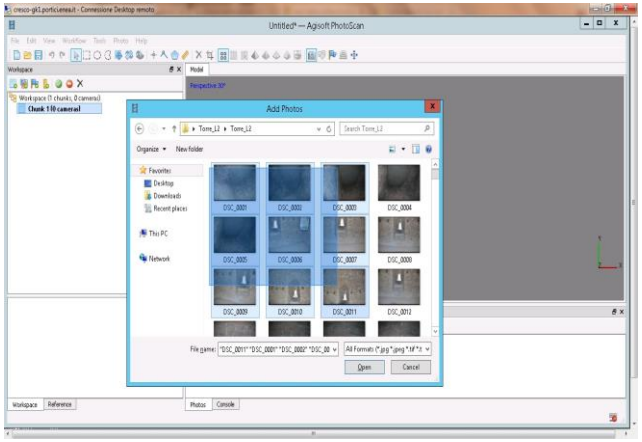
Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

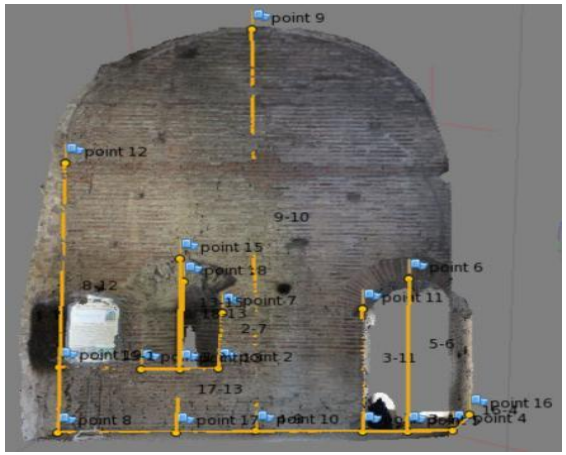
Restituzione 3D fotogrammetrica dalle immagini digitali 2D

Passo 1: Creazione sessione di lavoro **(CHUNK)**

Passo 2: Caricamento delle **immagini** digitali

Passo 3: Allineamento delle immagini





Passo 4: Creazione della **dense cloud**

Passo 5: Creazione del **modello poligonale**

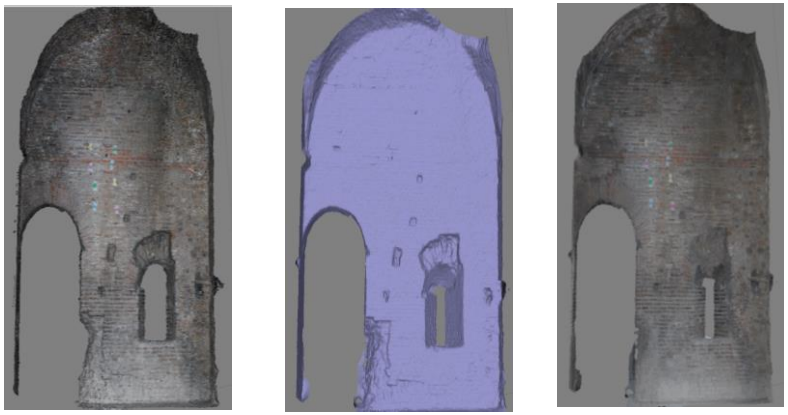
Passo 6: Creazione del **modello texturizzato**

Passo 7: Scalare il modello 3D per ottenere le dimensioni reali

Workflow base per la ricostruzione 3D

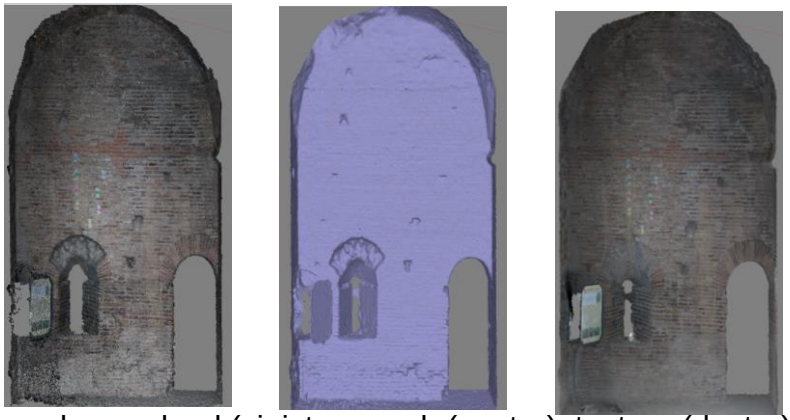
Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

Parete est



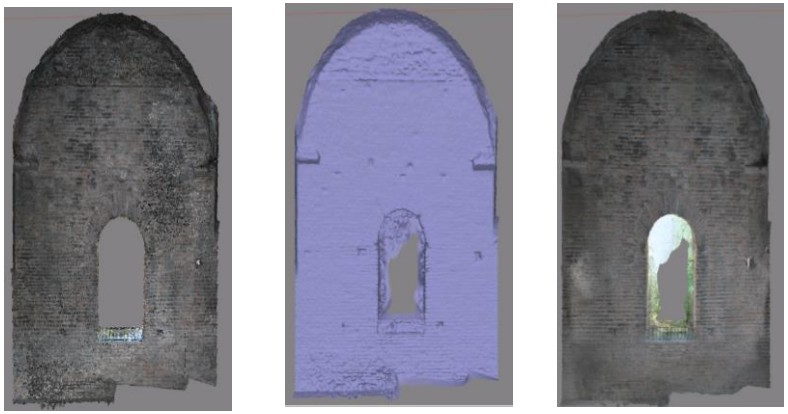
dense cloud (sinistra, mesh (centro), texture (destra)

Parete ovest



dense cloud (sinistra, mesh (centro), texture (destra)

Parete nord



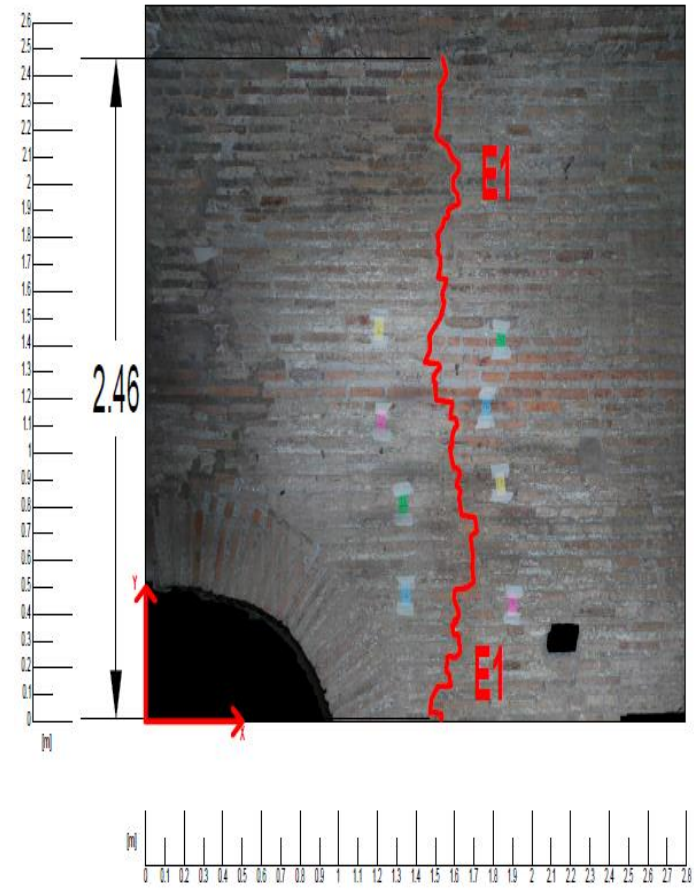
dense cloud (sinistra, mesh (centro), texture (destra)

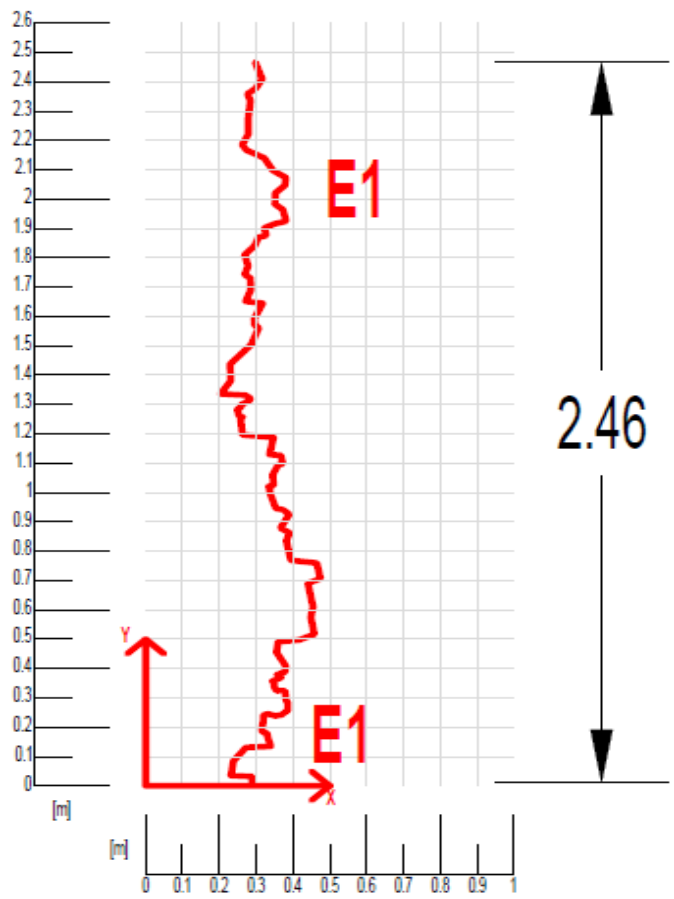
Parete sud

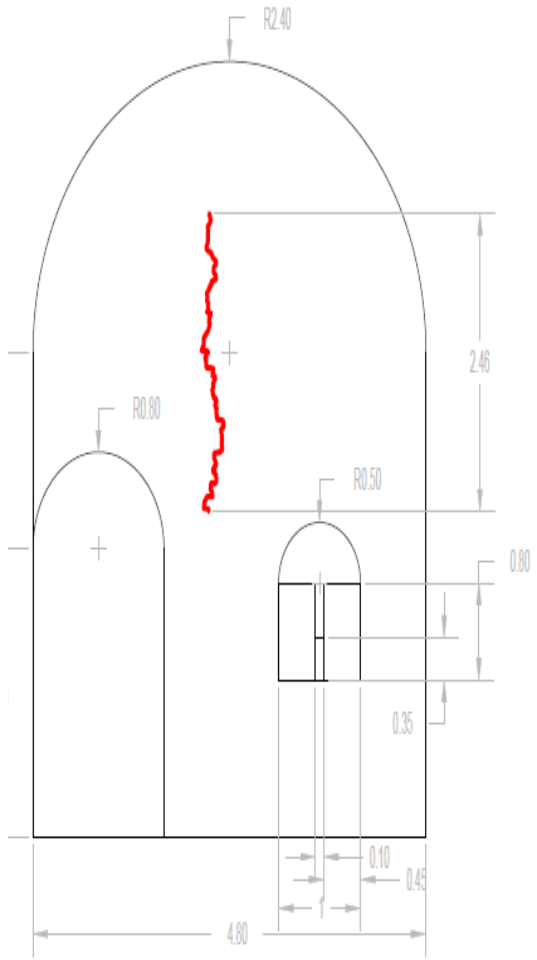
dense cloud (sinistra, mesh (centro), texture (destra)

Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

Torre L2: Quadro fessurativo parete est

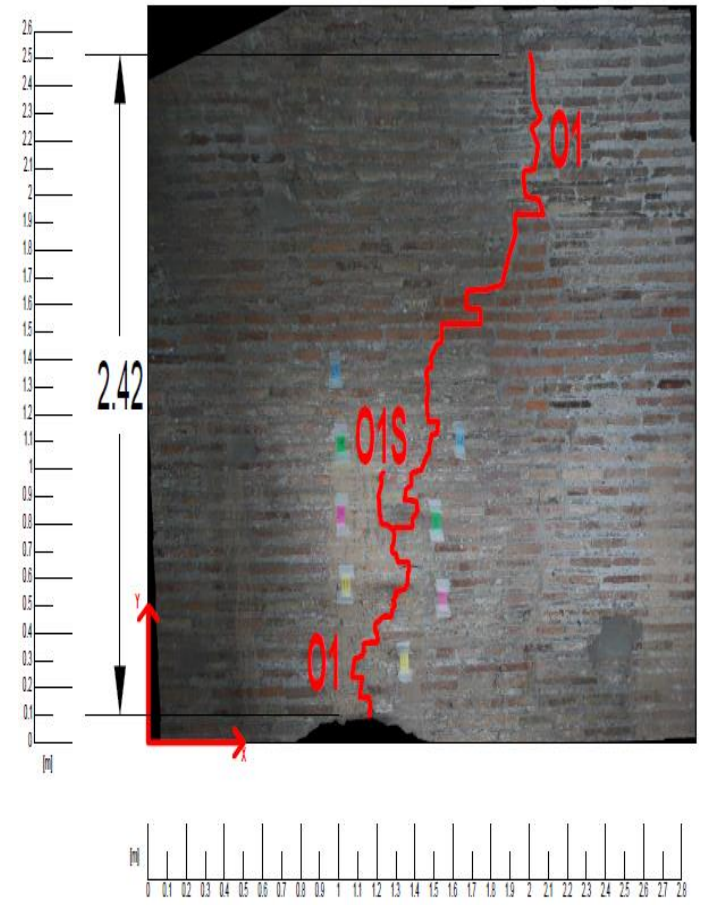


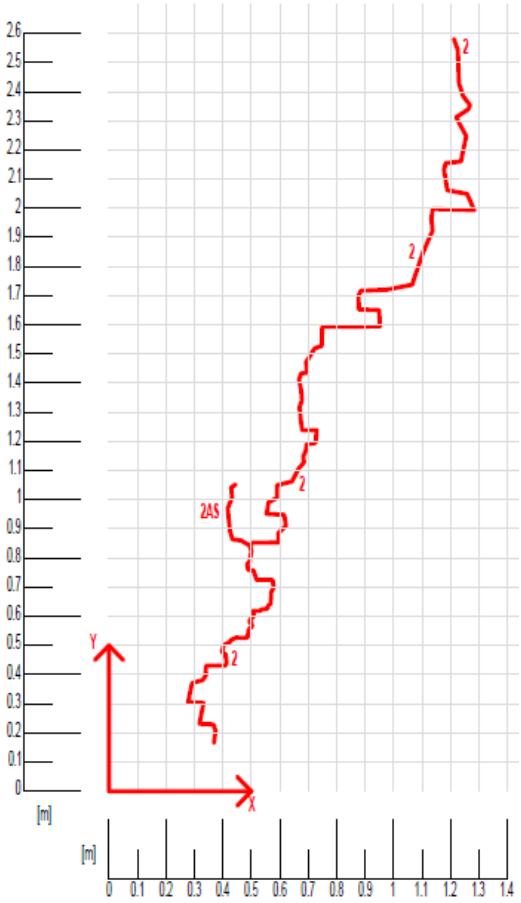


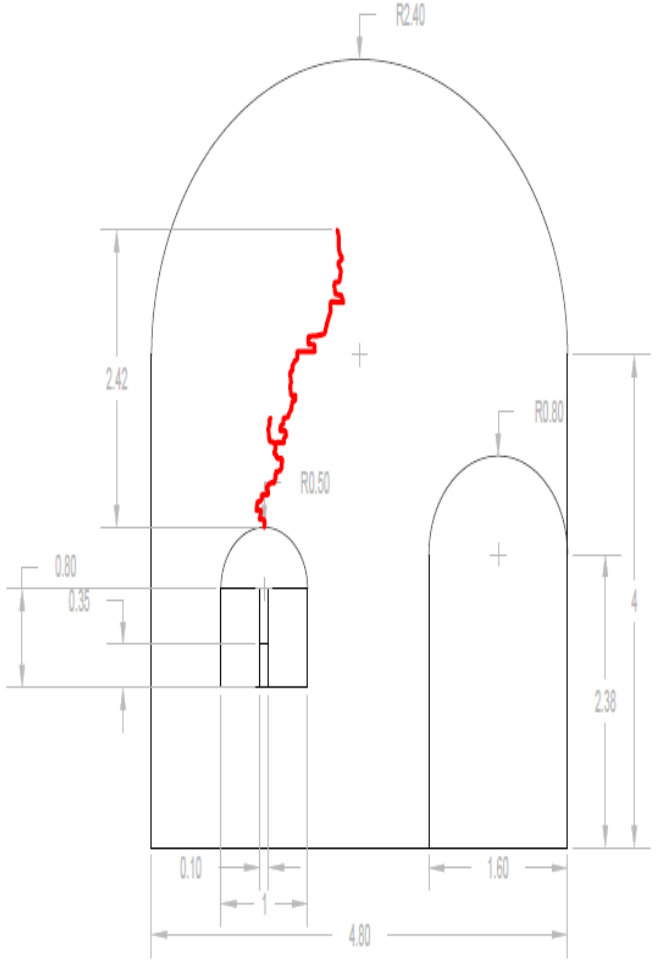


Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

Torre L2: Quadro fessurativo parete ovest







Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

Tassonomia delle fessure nelle pareti EST e OVEST

Codice Fessura	Coordinate Inizio		Coordinate Fine		Estensione [m]	Categoria di danno
	X_i [m]	Y_i [m]	X_f [m]	Y_f [m]		
1	0,29	0,01	0,3	2,47	2,46	2
2	0,37	0,17	1,21	2,58	2,42	2
2AS	0,5	0,84	0,45	1,05	0,21	1

EMS98 (schede di II livello GNDT)

Categoria	Livello di danno
1	Lieve
2	Moderato
3	Grave
4	Molto grave
5	Crollo

I modelli numerici

- I modelli numerici **consentono di affiancare tutti i passi della sperimentazione dal rilievo geometrico alla definizione del modello agli elementi finiti (FE) e alla sua relativa calibrazione mediante i dati delle PND** (proprietà meccaniche, definizione delle condizioni al contorno ecc. ecc)
- La tecnica di ricostruzione **3D fotogrammetrica via SfM (Structure from Motion) è una tecnica speditiva che in tempi rapidi permette di restituire un modello 3D metricamente corretto**
  - Tecnica di supporto alla definizione e calibrazione dei modelli FE
  - Può essere considerata ad integrazione di altri strumenti e sistemi di diagnostica e monitoraggio
- **I modelli numerici sono stati definiti sull'infrastruttura di calcolo ICT dell'ENEA**, mediante interfacce user-friendly che danno accesso alle risorse hardware e software della griglia
- **I dati** (foto, file excel, output delle restituzioni 3D, i risultati delle analisi FE, misure sperimentali) **sono fruibili dal Repository**, condivisi su owncloud e archiviati su afs/gpfs, per future elaborazioni

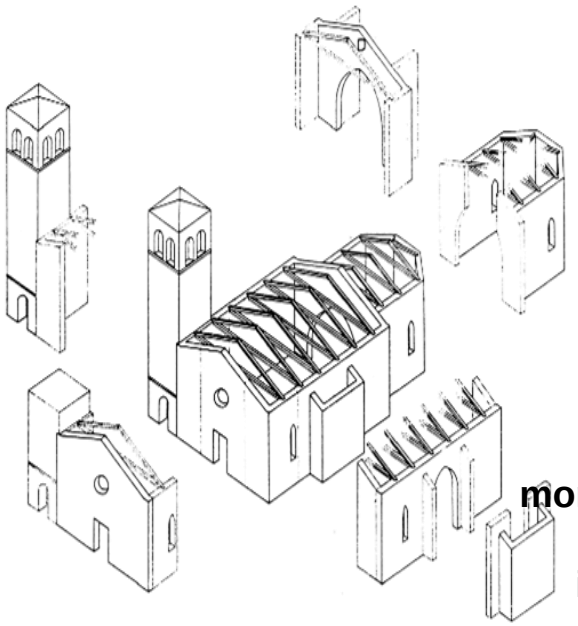
Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

- **Scomposizione del manufatto** in più elementi architettonici detti macroelementi…

- Solitamente è formato da più **pareti ed elementi orizzontali connessi tra loro** a costituire una parte costruttivamente unitaria ...

- Pur se **in genere collegata e non indipendente dal complesso della costruzione** [Doglioni 1994]

"parti delle chiese riconoscibili architettonicamente (facciata, abside, arco trionfale), caratterizzati da una **risposta sismica autonoma** dal resto della fabbrica" (Doglioni et al. 1994)



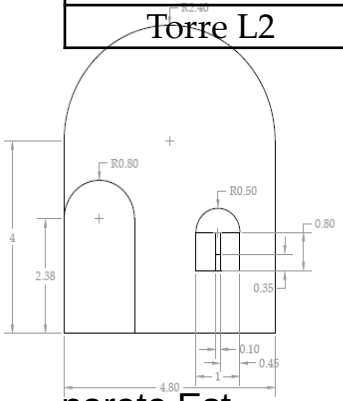
Analisi dei meccanismi di danno locale

Metodo della misura degli spostamenti

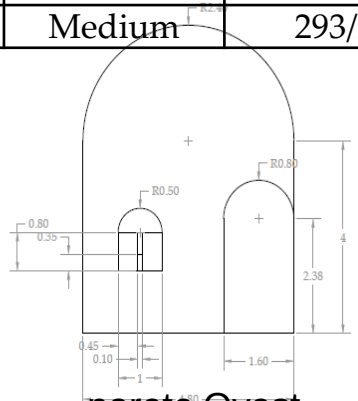
Mediante differenti tecniche di monitoraggio tradizionali ed innovative (NDT, fessurimetri, laser scanner, interferometria satellitare, ecc.ecc.)

Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

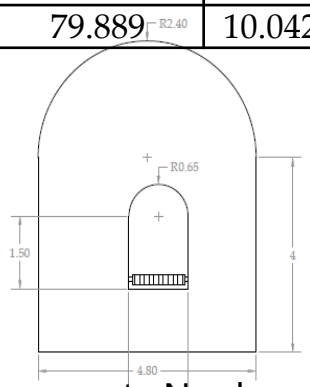
Elaborazione	Qualità	allineamento	Tie Points	Dense Cloud Points	3D Model Faces
Torre L2	Medium	293/293	79.889	10.042.183	1.794.696



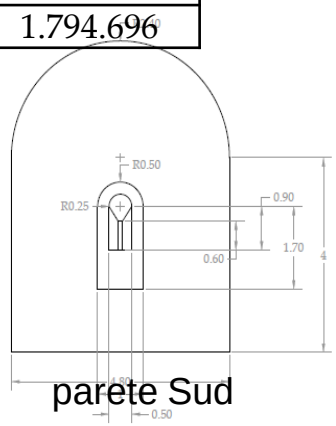
parete Est



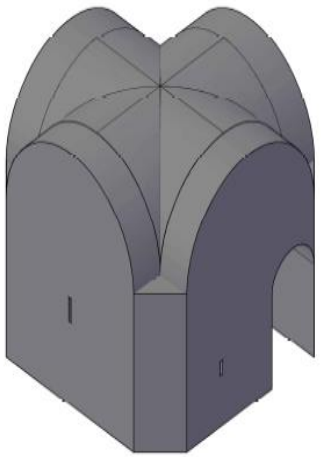
parete Ovest

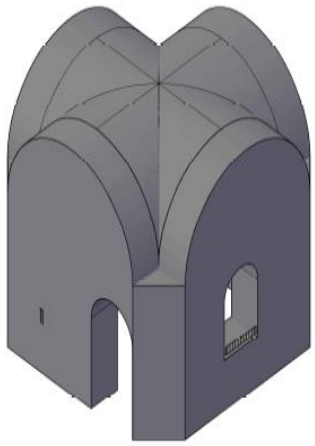


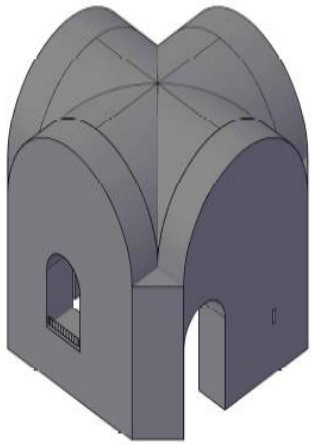
parete Nord

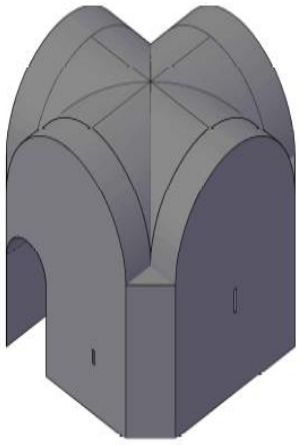


parete Sud


vista Sud/Est

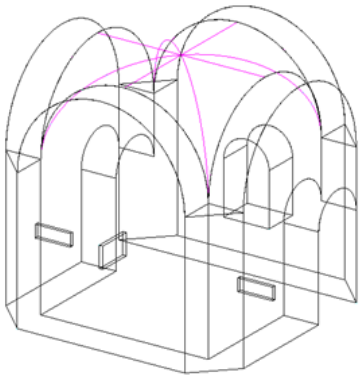

vista Nord/Est

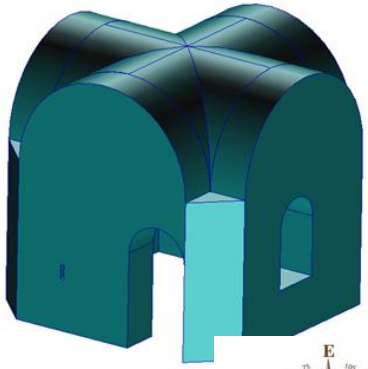

vista Nord/Ovest

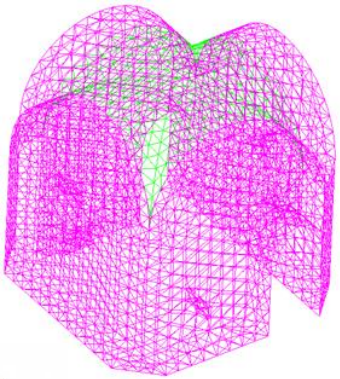

vista Sud/Ovest

Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

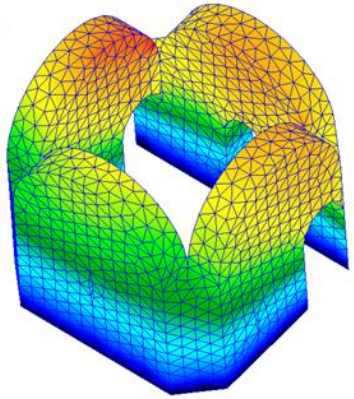
FEM and FEA



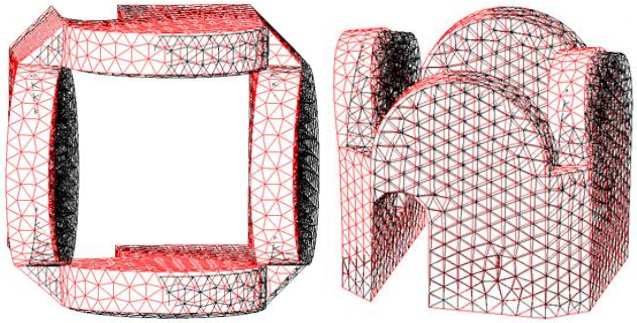




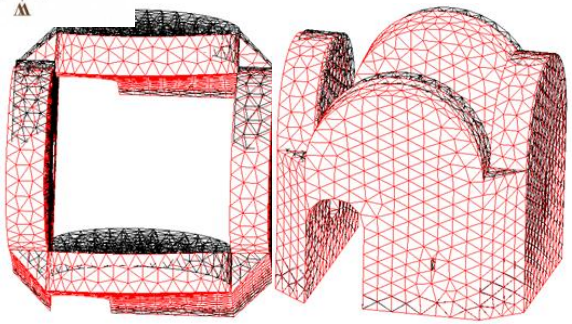
- 3646 nodes
- 464 Tria elms
- 10646 Tetra elms
- 11110 elms
- E = 1.8 E+9 kg/m^2
- ρ = 1800 kg/m^3
- Poisson = 0.15



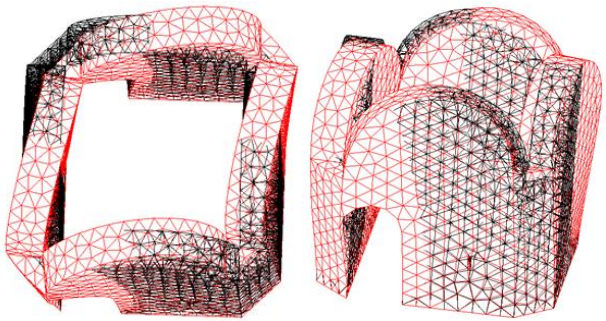
Static analysis – Strain Energies



1st mode: North/South (12 Hz)



2nd mode East/West (12,5 Hz)



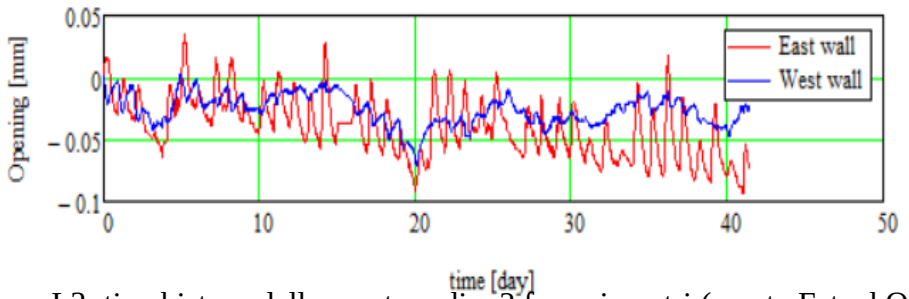
3rd mode Torsional (21,6 Hz)

Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

Attività in corso

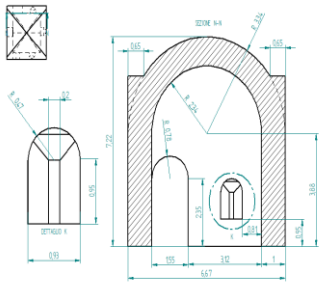
Nuova installazione sensori FBG per il monitoraggio in continuo (settembre 2018)

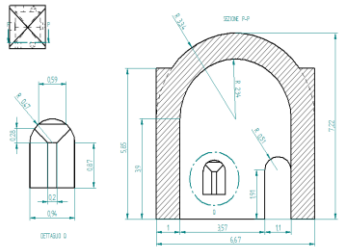
- ❖ delle lesioni sulle pareti della torre L2
- ❖ in alcuni tratti del camminamento esterno

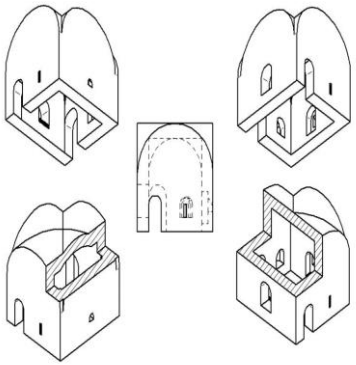


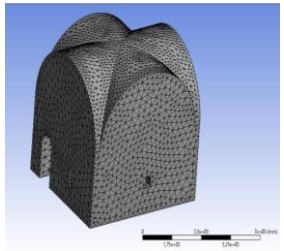
Torre L3: timehistory della apertura di n.2 fessurimentri (parete Est ed Ovest)

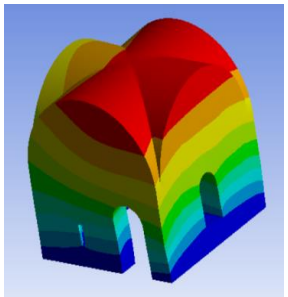
Dimostratore: Le Mura Aureliane-Torre L2
Museo delle Mura (Porta San Sebastiano – Roma)

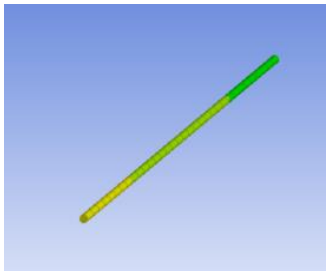












Conclusioni

- I modelli numerici, ampiamente supportati dalle linee guida rappresentano un valido strumento per la tutela del patrimonio artistico.
- Sono di ausilio alle attività sperimentali in laboratorio e in campo
- L'infrastruttura ICT, dell' ENEA, per il Patrimonio Culturale, già da tempo disponibile, via web, da remoto, consente agli utenti autorizzati, di disporre delle risorse hardware e software, per l'intera catena di modellazione numerica:
  - le ricostruzioni 3D
  - i modelli FE e loro calibrazione da misure diagnostiche,
  - aree di storage e di sharing, geograficamente distribuite e virtualmente illimitate
  - strumenti per il lavoro collaborativo a distanza
- Il sistema di monitoraggio integrato FBG-Fotogrammetria, applicato al dimostratore delle Mura Aureliane costituisce un esempio pienamente replicabile alle strutture monumentali archeologiche e ai palazzi storici presenti nel VI municipio di Roma

Grazie!

Marialuisa Mongelli
marialuisa.mongelli@enea.it