

Politecnico di Torino

Corso di laurea in: ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE A.a. 2021/2022 Sessione di laure luglio 2022

Geomatica per	r la digitalizzaz	zione del patrir	monio del XX se	ecolo.
Il caso di Torino Es _i	posizioni: com	parazione tra	progetto e real	izzazione

Relatrice: Candidata:

Antonia Teresa Spanò Ilaria Cofano

Correlatore:

Sterfano Perri

Ai miei genitori; Ai miei nonni; A Francesca; A Gennaro; A zia Nunzia.



INDICE

ABSTRACT	13	CAPITOLO 3	
INTRODUZIONE	10	LA "STORIA" DEL COMPLESSO ARCHITETTONICO TORINO ESPOSIZIONI	58
INTRODUZIONE	16	21 Da Palazzo della Mada a Tarina Fancaiziani	0.0
CAPITOLO 1		3.1 Da Palazzo della Moda a Torino Esposizioni3.2 Il contributo di Nervi a Torino Esposizioni	60 66
LA GEOMATICA PER LA DIGITALIZZAZIONE DEL PATRIMONIO	18	3.3 Sviluppo architettonico: i Padiglioni	80
LA GEOMATIGAT EN EA DIGITALIZEA EL GIAL DEL TATRIMONIO	10	3.3.1 Il Padiglione B: aspetti funzionali e costruttivi	84
1.1 Cosa significa digitalizzazione?	20	3.3.2 Il Padiglione C: aspetti funzionali e costruttivi	91
1.2 La digitalizzazione del patrimonio architettonico	21		0.
1.3 Il prodotto digitale	27	CAPITOLO 4	
1.4 Strumenti e tecniche di rilievo 3D per la digitalizzazione del patrimonio architettonico.	30	IL RILIEVO DEL LABORATORIO DI GEOMATICA DEL POLITECNICO DI TORINO	96
1.4.1 II sistema GNSS/GPS	32	4.1 Inquadramento	
1.4.2 Misure topografiche tradizionali	35	4.2 Obiettivo della ricerca	98
di vertici e punti di controllo	33	4.3 Il Rilievo del laboratorio di Geomatica del Politecnico di	
1.4.3 La Fotogrammetria e i suoi	37	Torino	102 103
sviluppi	07		103
1.4.3.1 Fondamenti analitici della	38	CAPITOLO 5	
fotogrammetria	00	COMPARAZIONE TRA IL PROGETTO E LA REALIZZAZIONE DEL	110
1.4.3.2 La fotogrammetria digitale	39	"PADIGLIONE C" DI TORINO ESPOSIZIONI	110
1.4.4 LiDAR	41	5.0	
		5.1 Nervi e il disegno	
		5.2 La fase di analisi e ricerca	112
CAPITOLO 2		5.3 La digitalizzazione dei disegni di progetto di Pier Luigi Nervi	112
IL FERROCEMENTO E LE STRUTTURE RESISTENTI PER FORMA	44	5.3.1 Le fondazioni	115
		5.3.1.1 Il rilievo termico	116
2.1 L'innovazione del secolo: il cemento armato	45	5.3.2 Gli arconi e la volta	119 130
2.2 Il brevetto di P. L. Nervi: il ferrocemento	48	5.3.2.1 Comparazione dei disegni digitalizzati con i	138
2.3 La prefabbricazione del ferrocemento	51	disegni estrapolati dalla nuvola di punti.	130
2.4 Le "strutture a guscio"	54	5.3.3 La modellazione 3D	152
		5.3.3.1 La comparazione tridimensionale della nuvola	152
		di punti e il 3D ricavato dai disegni originali.	164

CONCLUSIONI	
BIBLIOGRAFIA	168
	172
SITOGRAFIA	179
INDICE DELLE IMMAGINI	179
	180

ABSTRACT

Questo lavoro di tesi si sviluppa intorno al tema della digitalizzazione, in particolare riferita al patrimonio del XX secolo. Negli ultimi anni sta diventando sempre più importante il concetto di conservazione del patrimonio architettonico. Questa infatti è la direzione in cui sono orientati i progressi tecnologici di molti ambiti, e la geomatica è una di queste. Quanto detto è valido per il rilievo e la modellazione 3D: con gli strumenti di oggi, infatti, è possibile ricostruire modelli con elevata precisione e dunque custodire una grande quantità di informazioni riguardanti i beni di una certa importanza o addirittura a rischio. La digitalizzazione del patrimonio architettonico si rende indispensabile per numerosi ambiti, come la sicurezza (es. strutturale), la conservazione, la diffusione della cultura (es. interattività musei) e della fruibilità di un bene ecc.

Ad oggi sempre più istituzioni stanno appoggiando questo tema, come la "Getty Foundation" che nel 2019 con il progetto "Keep it Modern" ha identificato alcuni progetti del patrimonio storico e architettonico del XX secolo stanziando dei fondi per la realizzazione di piani di conservazione, con l'obiettivo di definire dei modelli per la conservazione di altri edifici. Nel 2019 è stato selezionato il Complesso di Torino Esposizioni e il lavoro di ricerca multidisciplinare è stato affidato al Politecnico di Torino. Tra i vari team di ricerca coinvolti, quello del Laboratorio di Geomatica si è occupato del rilievo metrico dei due padiglioni del Complesso utilizzando strumenti e tecnologie avanzate.

In questa tesi è stato svolto un lavoro di ricerca sul padiglione C del complesso di Torino Esposizioni analizzando e raccogliendo le numerose informazioni a disposizione, dai disegni originali del progettista Pier Luigi Nervi,al rilievo metrico dello stato attuale dell'edificio.

Da qui si propone di comparare i disegni del progetto originale con le rappresentazioni 2D e 3D ricavate dal rilievo metrico dello stato attuale, cercando di individuare eventuali anomalie e/o modifiche apportate in fase di cantiere da Nervi che oltre ad esserne il progettista era anche direttore dei lavori in cantiere.

In particolare, la ricerca si sviluppa intorno agli elementi strutturali principali della sala C del complesso di Torino esposizioni.

INTRODUZIONE

"Il patrimonio digitale è un insieme di risorse insostituibili di conoscenza ed espressione umana. Esso comprende risorse culturali, formative, scientifiche e amministrative, come anche informazioni di natura tecnica, giuridica, medica e di altro genere, create in digitale, o convertite in forma digitale a partire da risorse analogiche già esistenti". [UNESCO; 2003]

Parte di queste risorse digitali costituisce un patrimonio di grande valore che deve essere protetto e conservato per poter essere condiviso con le generazioni attuali e future. Infatti, uno degli scopi principali della conservazione del patrimonio digitale è quello di garantire accessibilità a tutti. È molto importante, per far si che questo accada, prendere misure opportune per l'intero ciclo di vita dell'informazione digitale, dalla produzione all'accessibilità.

Ad oggi la tecnologia consente di "conservare i beni" con nuove tipologie di acquisizione e gestione delle informazioni in diversi campi come architettonico, museale, archivistico, bibliotecario ecc.

Intorno agli anni '30 ha avuto inizio una campagna di selezione e catalogazione dei beni culturali allo scopo di tutelarli; oggi, con l'avvento della rivoluzione digitale si è riusciti a fornire strumentazioni avanzate nel campo delle ricerche e, dunque, migliorare l'accessibilità ai contenuti e ai luoghi.

[UNESCO; 2003]

In questa tesi viene approfondito il tema della digitalizzazione soffermandosi sul patrimonio architettonico delle strutture in calcestruzzo appartenente al XX secolo.

Attualmente sono ancora tanti i luoghi e siti del patrimonio del XX secolo a rimanere a rischio, minacciati da una generale mancanza di riconoscimento e consapevolezza. Proprio a causa di queste minacce Il Comitato Scientifico Internazionale sul Patrimonio del XX secolo (ISC20C) dell'ICOMOS nel 2010 ha redatto un teso di riferimento che definisce l'approccio e i principi da applicare per il patrimonio appartenente a questo secolo. Come l'ISC20C negli ultimi anni sono molte le istituzioni che stanno viaggiando in questa direzione con l'attuazione di progetti e iniziative per incoraggiare e promuovere la tutela e la conservazione del patrimonio architettonico.

Questa tesi nasce proprio da una di queste iniziative, che riguarda il complesso di Torino Esposizioni. Quest'ultimo è stato selezionato per il "keeping it Modern-Planning Grant 2019", un progetto finanziato dalla Getty Foundation che propone, in seguito ad una prima fase valutativa e diagnostica, l'elaborazione di un piano di conservazione (che servirà a sviluppare un progetto di "conservazione, retrofit e riutilizzo") dell'edificio.

[Lenticchia, E.; 2017]

Il progetto è stato affidato al Politecnico di Torino e prevede una valutazione sismica (al fine di garantire la conformità edilizia dell'edificio secondo la normativa vigente), incluse prove strutturali non invasive, oltre al rilievo metrico, modellazione 3d e ricerca e analisi della documentazione archivistica e storica. È stato, quindi, necessario un tipo di lavoro multidisciplinare, formato da vari gruppi di ricerca del Politecnico di Torino, tra cui quello di Geomatica. [Getty Foundation; 2019]

Quest'ultimo ha svolto tutta la fase di rilievo e di digitalizzazione delle opere di Pier Luigi Nervi all'interno del complesso di Torino Esposizioni, ovvero i Padiglioni B e C.

Data la complessità dell'edificio, ai fini dell'analisi strutturale si sono rivelati fondamentali l'accuratezza e la quantità di informazioni ottenute con il rilievo effettuato.

[Sammartano, G., et al; 2021]

Sulla base del materiale a disposizione del candidato, la tesi propone di comparare quanto ricavato dalla prima fase di rilievo con quanto riportato sui disegni originali di progetto di Pier Luigi Nervi. In particolare, la ricerca si concentra sugli elementi strutturali principali della sala C del complesso; per ogni elemento da approfondire il lavoro è stato suddiviso in tre fasi:

- Ricerca
- Digitalizzazione dei disegni originali in 2D e 3D.
- Comparazione bidimensionale e tridimensionale degli elementi ricavati dalla digitalizzazione dei disegni originali con quelli estrapolati dalle nuvole di punti ottenute con il rilievo del gruppo di geomatica.

CAPITOLO 1

LA GEOMATICA PER LA DIGITALIZZAZIONE DEL PATRIMONIO

1.1 Cosa significa digitalizzazione?

Il termine "digitalizzazione" indica la trasformazione di un oggetto dalla sua forma fisica (come per esempio fotografie, manoscritti e libri) in formato digitale. Un esempio di digitalizzazione potrebbe essere quello di scannerizzare un qualsiasi documento scritto (o un qualsiasi altro documento) trasferendolo su un supporto informatico. Tecnicamente il processo di digitalizzazione si suddivide in diversi passaggi:

- La trasformazione di un dato in numeri (per esempio 0 e 1 per i sistemi binari).
- I dati, diventati numeri, vengono digitalizzati in informazioni codificate.
- L'informazione codificata viene decodificata e trasformata in una rappresentazione grafica per il pubblico a cui è rivolto.

[King, V.T.;2016]

Negli ultimi anni, le risorse digitali disponibili sono tante e in diversi formati, dalle più semplici come le fotografie e i video a quelle più articolate come ricostruzioni 3D e simulazioni VR (Virtual Reality). Questo ha permesso, non soltanto a livello professionale ma, anche per il pubblico di avere semplice accesso ai dati e con più facilità di comprensione.

[Meschini, A.; 2011]

1.2 La digitalizzazione del patrimonio architettonico

I nuovi progressi tecnologici, in particolare negli ambiti del rilievo e della modellazione 3D (tridimensionale), attraverso la digitalizzazione sono in grado di custodire con elevata precisione i beni che sono di una certa importanza o addirittura a rischio. Un esempio di applicazione riguarda i beni museali, che stanno diventando sempre più accessibili grazie alla realizzazione di "biblioteche digitali multilingue": le strategie utilizzate possono essere diverse, dalla realizzazione di modelli tridimensionali sempre più vicini alla realtà, alle mostre interattive e/o immersive fino all'utilizzo di VR (Virtual Reality).

[Donadio, E.; et al, 2018]

Inoltre, con lo sviluppo di queste nuove tecnologie si è potuti privilegiare anche la documentazione del patrimonio architettonico; in particolare, a beneficio delle attività di elaborazione ed acquisizione (per restaurare e documentare i manufatti architettonici anche più complessi). Questo nuovo approccio per il patrimonio architettonico oltre a valorizzare il bene in questione riesce a fornire metodi più efficaci per la salvaguardia di quest'ultimo.

[De Luca, L.; Lo Buglio, D.;2017]

Infatti, il patrimonio culturale architettonico (ma non solo) di tutto il mondo ogni giorno va sempre più incontro al bisogno di doverne valutare lo stato di conservazione, perché sempre più spesso viene messo in pericolo da rischi naturali ed artificiali. Queste preoccupazioni nascono dalla volontà di volerne lasciare una memoria per le future generazioni. In questi ultimi anni sono molte le istituzioni che si stanno dedicando alla conservazione e recupero del patrimonio culturale (come Getty Foundation, Smithsonian institution o Europeana) sostenendo:

- Ricerca
- Cultura
- Attività educative. [Donadio, E.; et al, 2018]

Per la documentazione digitale del patrimonio architettonico i sistemi di rappresentazione sono caratterizzati dall'integrazione di diversi punti di vista e contributi come la geomatica, il rilievo metrico, la progettazione, l'analisi geometrica e la documentazione dello stato di conservazione degli edifici;

Insieme questi ultimi sono in grado fornire, al tema della digitalizzazione del patrimonio architettonico, strumenti e tecniche in grado di arricchirne la documentazione ma anche di utilizzare le metodologie più adatte per la rappresentazione di quest'ultimo.

La rappresentazione tridimensionale può essere una di queste; essa può essere utile sotto vari aspetti come per esempio: per la documentazione delle opere architettoniche, per le analisi di degrado, per la diffusione culturale e per l'incentivo del patrimonio ecc. Questo perché la rappresentazione 3D di un qualsiasi oggetto (che sia un'opera architettonica o meno) attraverso l'utilizzo della digitalizzazione può diventare uno strumento di analisi, di valutazione scientifica o di trasmissione della conoscenza.

[De Luca, L.; Lo Buglio, D.;2017]

Tuttavia, l'utilizzo della rappresentazione 3D per uno qualsiasi degli scopi sopraelencati non deve togliere nulla al modo in cui guardiamo l'oggetto reale. Ed è proprio per questo che è molto importante, oltre alla realizzazione di un modello tridimensionale, costruire innanzitutto un modo di guardare l'oggetto: in che modo deve trasmettere la sua conoscenza. Questo consiste nella costruzione di un modo di guardare che mette in primo piano la trasmissione della conoscenza.

[De Luca, L.; Lo Buglio, D.;2011]

Le nuove tecnologie della geomatica che sono implicate nella digitalizzazione introducono nuovi metodi per riprodurre l'ambiente costruito con maggiore precisione, completezza e minor tempo di restituzione grafica.

[De Luca L.; Lo Buglio D.,2017]

Però, uno degli aspetti negativi per quanto riguarda l'applicazione di queste nuove tecnologie è il sovraccarico e la gestione dei dati che spesso è dovuta dalle nuvole di punti e modelli 3D. Per quanto riguarda la gestione dei dati, ritornando all'esempio riguardante l'interattività all'interno dei musei (citato all'inizio di questo capitolo), la gestione dei dati da parte di questi ultimi infatti richiede procedure di ottimizzazione per quanto riguarda il "peso" dei file digitali, per poterli gestire in maniera più semplice.

Per questo la ricerca sta cercando di orientarsi verso nuove tecnologie che facilitino il trattamento e la classificazione di questi dati evitandone il sovraccarico.

[Meschini, A.; 2011]

Alle spalle di queste evoluzioni tecnologiche non c'è solo una fase di ricerca o lo sviluppo delle strumentazioni ma, anche un lavoro di documentazione che serve principalmente ad aumentare le informazioni dei materiali prodotti. Questo tipo di informazioni ad oggi in Italia può essere molto utile per lo studio del patrimonio del XX secolo, al quale oggi viene rivolta una grande attenzione.

[De Luca L.; Lo Buglio D.,2017]

Questo perchè la maggior parte del patrimonio edilizio del XX secolo ad oggi si trova in condizioni di degrado costruttivo e prestazionale. Ciò è dovuto dal fatto che il XX secolo è stato caratterizzato da una serie vicende (le due Guerre Mondiali, la Guerra Fredda, La Grande depressione e la decolonizzazione) che hanno cambiato il tessuto sociale del secolo: lo sviluppo delle grandi città dovuta da una rapida urbanizzazione, lo sviluppo tecnologico, scientifico e delle comunicazioni e l'invenzione dei trasporti pubblici hanno contribuito a cambiare il nostro modo di vivere producendo nuovi edifici e strutture. Contribuendo oltretutto a distruggere il paesaggio per dare spazio agli edifici per le nuove industrie.

Di questo gran numero di costruzioni del XX secolo sono ancora molte a non essere state registrate e protette per il loro valore di "patrimonio"; spesso alcune di esse vengono riqualificate o modificate senza alcuna logica o addirittura lasciate a sé stesse. Per sopperire a queste minacce diversi comitati e organizzazioni si sono occupati di questo tema cercando di incoraggiare e promuovere l'importanza del patrimonio, come per esempio: [ICOMOS: 2017]

- Il Comitato Scientifico Internazionale sul Patrimonio del XX secolo (ISC20C) dell'ICOMOS nel 2010 ha redatto un testo di riferimento per delineare l'approccio e principi per la gestione e interpretazione dei siti del XX secolo, con lo scopo di diventare un punto di riferimento internazionale. [ICOMOS; 2017]
- UNESCO che è l'Organizzazione delle Nazioni Unite per

l'Educazione, la Scienza e la Cultura. Nell'ambito del patrimonio, si occupa di identificare, proteggere, tutelare e trasmettere il patrimonio culturale e naturale alle future generazioni. [UNESCO]

 CIPA che è un'organizzazione internazionale che si occupa, tramite l'applicazione di tecnologie avanzate, della "registrazione, conservazione e documentazione del patrimonio culturale in tutte le sue possibilie forme". Non a caso le organizzazioni con cui collabora sono: ICOMOS (International Council of Monuments and Sites) e ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing). [CIPA]

Per contribuire alla conservazione del patrimonio del XX secolo molteplici istituzioni stanno sviluppando una serie di progetti ed iniziative concrete mirate alla salvaguardi di quest'ultimo. Un fattore che accomuna questi progetti è di sicuro la "multidisciplinarità" che fa si che il lavoro venga svolto da diversi gruppi specializzati in diversi campi in modo da poter analizzare il tutto a 360°.

Uno dei tanti esempi è il progetto InnovativeConcrete: iniziativa finanziata da Horizon, che sta cercando di contribuire alla conservazione dei monumenti in calcestruzzo del XX secolo, formata da un team di lavoro di 29 persone, che hanno lo scopo di realizzare nuove nanotecnologie per contrastare il deterioramento del calcestruzzo che caratterizza una buona parte del patrimonio del XX secolo.

[Harboe, G.; et al. 2021]

Infatti, questa attenzione diretta alle strutture spaziali in calcestruzzo, negli ultimi anni ha portato a realizzare diversi piani di conservazione per affrontare il loro deterioramento. Per questo risulta molto efficace un tipo di approccio multidisciplinare con indagini accurate che possono provvedere a fornire approcci standard che con indicazioni più chiare sulla documentazione 3D, sulla gestione delle informazioni e la valutazione e il monitoraggio strutturale. In questo ambito la geomatica sta portando avanti l'attenzione verso la digitalizzazione multiscala e multisensore per la gestione di informazioni articolate in modelli 3D arricchiti.

[Sammartano, G.; et al; 2021]

Ad oggi la TSL (terrestrial laser scanning) e la fotogrammetria (terrestre o aerea), grazie alla registrazione degli aspetti di dimensione e colore di un edificio, vengono utilizzate per ricreare anche le forme architettoniche più complesse; e grazie agli sviluppi tecnologici che riguardano le fasi di elaborazione e acquisizione è possibile aggiornare e integrare nel corso del tempo i dati dell'oggetto documentato. Possiamo definire rispettivamente i laser scanner e la fotogrammetria come sensori attivi e passivi:

- Sensori attivi (laser scanner): misurano gli oggetti tramite dei segnali che registrano il tipo di risposta riflesso.
- Sensori passivi (fotogrammetria): utilizzano la luce dell'ambiente per acquisire le immagini da elaborare tramite la registrazione elettromagnetica diffusa dall'oggetto da rilevare.

Inoltre, nella fase di elaborazione dati è possibile produrre differenti elaborazioni in base alle esigenze di progetto: dal solo apparato geometrico-morfologico, all'analisi della forma fino allo studio dei materiali, delle strutture e degli elementi costruttivi.

Le nuvole, poi prodotte nella fase di elaborazione, possono essere texturizzate attraverso l'utilizzo di ortofoto di precisione (rappresentazione bidimensionale che si può ottenere tramite un modello di fotogrammi orientati, cioè che è stata determinata la posizione esatta del centro di presa durante l'acquisizione dei fotogrammi); questi modelli, texturizzati o meno, tramite ulteriori elaborazioni possono originare diverse rappresentazioni sia bidimensionali che tridimensionali.

[Spanò, A.; 2017]

Negli ultimi anni la modellazione basata sulle immagini si trova in ad un punto in cui i costi, l'accessibilità, la qualità e le differenze dei risultati soddisfano molte più esigenze e vincoli.

Tra l'altro gli attuali progressi nell'analisi delle immagini e nel campo del 3D hanno permesso l'utilizzo di processi automatici; in modo particolare per l'estrazione dei punti corrispondenti, la calibrazione e l'orientamento delle immagini e così anche per quanto riguarda la generazione di nuvole di punti molto dense (che possiamo definire fotogrammetria digitale, che approfondiremo più avanti). Nell'ambito della conservazione e della valorizzazione l'utilizzo

della fotografia come mezzo di raccolta delle informazioni ad oggi è diventato un fattore molto importante aprendo una vastità di opportunità. Tra queste, molto rilevante è quella di riuscire a raccogliere le analisi delle forme urbane e architettoniche con l'obiettivo di migliorare la loro comprensione. Questo tipo di lavoro esige la padronanza tecnica, ma anche una considerazione delle pratiche e delle metodologie di documentazione affrontate dagli esperti del patrimonio che vanno a identificare una sorta di "protocolli" facili da mettere in pratica, accessibili a tutti e in grado di rispecchiare le esigenze legate alle descrizioni formali degli oggetti presi in considerazione.

La documentazione del patrimonio potrebbe inoltre creare una sorta di "biblioteca delle forme architettoniche", rendendo possibile le indagini sulla mutabilità delle istanze nel campo del patrimonio architettonico riuscendo a trovare anche soluzioni per la gestione di forme complesse o non classificate.

[De Luca L.; Lo Buglio D.;2012]

Unlavoro del genere è stato svolto dall'Historic England, un'istituzione che ha creato una di "biblioteca digitale" del patrimonio storico inglese. Questo lavoro consiste nella "mappatura" e descrizione del patrimonio ed ha avuto origine nel 1882 (periodo in cui si è iniziato a parlare di tutela del patrimonio), raccogliendo monumenti, edifici, campi di battaglia e relitti; ad oggi in totale sono stati registrati oltre 400.000 dati tra le categorie citate, ed è per questo che è considerato uno dei più grandi archivi dedicato alle risorse storiche del Regno Unito. [Historic England]

Oltre alla catalogazione di questi beni forniscono anche un "aiuto" concreto per il rilevo metrico dei beni culturali con il "Metric Survey Specification for Cultural Heritage (3rd end)" in cui vengono descritte le linee guida (secondo la legislazione inglese) per un corretto rilievo metrico per siti storici.

[Bryan, P.; et al; 2013]

1.3 Il prodotto digitale

Fattore caratterizzante di un elemento digitalizzato è che non può essere vincolato da problemi tipici di un oggetto fisico, non può per esempio essere soggetto a degrado ma può invece essere consultato da un numero di persone molto più vasto rispetto all'oggetto fisico. Inoltre, il prodotto digitale può essere modificato in base al pubblico da raggiungere, può essere scarnito delle parti di più difficile comprensione per poter essere diretto anche a un pubblico non altamente qualificato.

[Hindmarch, J.; 2015]

Possiamo affermare che l'epoca in cui ci troviamo oggi è caratterizzata "dalla rivoluzione digitale" che ha cambiato il nostro approccio cognitivo e il modo di lavorare. In archeologia, per esempio, la fotogrammetria e la modellazione tridimensionale consentono di documentare un intero processo di scavo e di ricostruire i contesti anche dopo la loro rimozione. Inoltre, grazie alla comunicazione digitale si possono creare ambienti di lavoro virtuali in cui possono collaborare studiosi di tutto il mondo.

Ed è proprio in quest'epoca di sviluppo digitale che anche il ruolo dei musei sta cambiando, le nuove tecnologie possono riprodurre un oggetto storico nei minimi dettagli come è accaduto al Museo Egizio di Torino: un sarcofago egizio è stato riprodotto con una precisione sub-millimetrica e sono state evidenziate anche tutte le fasi della sua produzione.

[Greco, C.; 2019]

Nel campo architettonico, con l'utilizzo delle tecniche della geomatica si possono raccogliere una serie di dati, ottimizzando tempistiche e costi, che possono essere interscambiati tra esperti di diversi settori disciplinari in modo tale da garantire una corretta comunicazione fra di essi.

[Barbiani,C.; Guerra,F.; Pasini, T.; 2018]

Negli ultimi anni l'utilizzo di queste tecnologie ha portato a definire una sorta di nuova disciplina "virtual heritage" o "virtual cultural heritage". Con questi termini si vanno ad indicare quelle modellazioni tridimensionali di ambienti, manufatti o architetture storiche o archeologiche (anche non più esistenti), interpretando,

tramite ricerche storiche attendibili, come siano mutati o meno nel corso degli anni. La modellazione 3D, rispetto alle sole illustrazioni grafiche o costruzione di plastici, può avvalersi di alcuni aspetti vantaggiosi. Infatti, avere una sorta di gemello digitale può permettere di modificare infinite volte la rappresentazione 3D da parte dei ricercatori; inoltre, il modello tridimensionale può essere trasmesso e replicato facilmente in modo tale da essere utilizzato da più persone e per più scopi senza modificarne la forma originaria. La costruzione 3D che riguardano il campo storico o archeologico (sopracitato) possono avere diverse tipologie di rappresentazioni:

- Filmati virtuali
- Installazioni
- Rendering
- · Serious Game
- Modelli tattili 3D
- VR (virtual reality)

Un esempio concreto di quanto appena esplicato è un progetto per il monastero di Dordrecht, che vede la collaborazione tra un'istituzione di natura storico-umanistica (archivio storico della città di Dordrecht in Olanda, DiEP) e una società tecnologica (studio grafico "Paladin"). Insieme, queste due istituzioni, hanno ricostruito tridimensionalmente il monastero di Dordrecht. Nello specifico è stata allestita una mostra museale in cui veniva rappresentato in 3D lo sviluppo storico, e quindi le modifiche nel corso dei secoli del monastero. (immagine 1.1) Esempi come questo appena citato sono innumerevoli e utilizzati per molteplici scopi.

Questi tipi di ricostruzioni tridimensionali hanno bisogno di una collaborazione multidisciplinare tra più figure di diversi ambiti come per esempio: storici, archeologici, conservatori, geomatici o specialisti di ICT (Information and Communication) ecc.

[Orlandi, M.; 2012]

Si può dire che l'esperienza digitale abbia apportato miglioramenti sia per i gli specialisti che ruotano intorno alla conservazione del patrimonio sia per la vita quotidiana, fino a renderla indispensabile semplificando anche la comunicazione con rapido scambio di informazioni. È da specificare però che, l'oggetto digitalizzato è da concepire come uno strumento di rappresentazione e non come

una sostituzione dell'oggetto visto che non riesce a coinvolgere tutti i sensi dell'uomo che ne è spettatore.

[Allegrezza, S.; 2015]

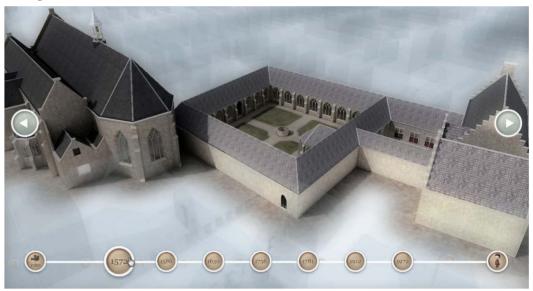


Immagine 1.1: ricostruzione tridimensionale dello sviluppo storico del monastero di Dordrecht. Fonte: The Monastery of Dordrecht.exe

I 1.4 Strumenti e tecniche di rilievo 3D per la digitalizzazione dell patrimonio architettonico

Oggi con l'espressione "Geomatica" si indica l'insieme delle discipline che si dedicano allo studio del territorio e degli ambienti, naturali ed antropici. Grazie allo sviluppo tecnologico dell'elettronica e dell'informatica si è andati a potenziare l'indagine e la rappresentazione con processi di acquisizione e trasformazione dei dati sempre più efficaci. Tutte le informazioni estrapolate dai rilievi sono quasi unicamente utilizzate in formato digitale. La restituzione può anche essere utile per individuare e analizzare l'origine di un manufatto la sua evoluzione costruttiva dalla sua conformazione iniziale fino alla sua situazione attuale; all'interno dei modelli digitali possono essere registrati dati che supportano l'interpretazione delle sue trasformazioni, gli elementi che lo caratterizzano, le anomalie, la forma strutturale e le sue condizioni statiche.

[Spanò, A.; Chiabrando, F. 2009]

Il rilievo costituisce una fase molto importante della Geomatica, con esso si raccolgono dati riguardanti l'oggetto di studio come caratteri formali, geometrici e di localizzazione. Il rilievo, inoltre, è considerato uno strumento molto importante per la fase di documentazione. Le discipline che fanno parte del campo della Geomatica sono diverse e sono considerate di valenza scientifica perché sono in grado di fornire dati geometrici misurabili.

Sono considerate discipline della Geomatica: informatica, cartografia, sistemi informatici territoriali, geodesia, scansione laser, topografia, posizionamento satellitare, telerilevamento e fotogrammetria. Spesso l'acquisizione dei dati durante il rilievo è caratterizzata anche dalla collaborazione di più di una delle discipline sopracitate.

Esistono due tipologie di rilievo per definire le coordinate di un oggetto: Il rilievo architettonico tradizionale e il rilievo architettonico metrico.

Il rilievo architettonico metrico (è quello che andremo ad approfondire per il lavoro di questa tesi), utilizza metodi avanzati per le misurazioni e unisce i metodi di misurazione diretta e indiretta

(quest'ultima ricava le dimensioni tramite calcoli matematici fra misure di altre grandezze fisiche).

Nel rilievo metrico ha un ruolo molto importante la Topografia che riesce a collocare l'oggetto di studio tramite un insieme di vertici detto "rete topografica".(immagine 1.2) Quest'insieme di vertici sono uniti tra di loro attraverso direzioni note da cui vengono eseguite le misure sull'oggetto; ciò garantisce di avere un unico sistema di riferimento con coordinate dei punti dell'oggetto da misurare precise, contenendo la propagazione dell'errore. Per realizzare una rete topografica si devono definire i vertici in modo tale da contenere tutto lo spazio da documentare e se necessario si eseguono raffittimenti dei vertici in ulteriori posizioni.

[Spanò, A.; 2018]

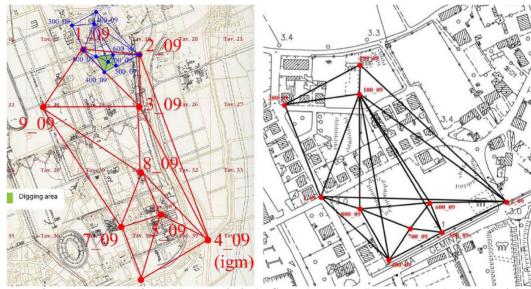


Immagine 1.2: Rappresentazione della rete principale d'inquadramento sulla carta archeologica dellacittà di Aquileia e rete topografica di raffittimento sovrapposta alla carta catastale; Fonte: Spanò, A.,2017

Per quanto riguarda le tecniche utilizzate per la digitalizzazione del patrimonio storico architettonico, rivestono un ruolo molto importante gli studi e i progetti volti alla sperimentazione dell'utilizzo dei metodi di rilievo 3D al fine di: supportare le indagini strutturali, identificare le caratteristiche e condizioni in cui versano gli edifici. Nei prossimi paragrafi saranno analizzati alcuni degli strumenti e tecniche utilizzate nel campo della Geomatica nella fase di rilievo.

1.4.1 II GNSS/GPS

Il GNSS (Global Navigation Satellite System) indica in generale tutti i sistemi di posizionamento satellitare globale. Questo include una serie di costellazioni e di satelliti in orbita attorno alla terra che trasmetteno continuamente segnali di posizione che possono essere usati per il posizionamento geospaziale globale di punti generici sulla superficie terrestre.

Il sistema GNSS si dividono in: (immagine 1.3)

- GPS (Global Positioning System) di origine americana che rappresenta il sistema GNSS più utilizzato al mondo.
- Glonass (GLObalnaya NAvigatisionnaya Sputnikovaya) di origine russa.
- BeiDou di origine cinese.
- · Galileo di origine europeo.

Nel campo della Geomatica i GNSS vengono utilizzati per sia individuare i vertici della rete topografica sia per i GCPs (Ground Control Points) utili al rilevamento del territorio.

Si possono quindi ottenere delle coordinate X,Y,Z di un qualsiasi punto sulla superfice terreste a patto che sia conosciuta la posizione dei satelliti del sistema di riferimento geocentrico (o anche ECEF, Earth-Centered Earth-Fixed). Nello specifico il calcolo di queste coordinate avviene tramite la misurazione di un numero minimo di range (cioè le distanze tra i satelliti e i ricevitori terrestri) e della componente temporale; cioè per calcolare le distanze è necessario conoscere l'intervallo di tempo impiegato dal segnale emesso dal satellite per raggiungere la superficie terrestre.

[Cina, A.; 2014]

Dopodiché dalle distanze si ricavano le coordinate geocentriche e

poi si trasformano in geografiche utilizzando il sistema di riferimento unificato mondiale UTM-WGS84. Il WGS84 i (World Geodetic System 1984) è un modello matematico della Terra basato sul sistema di riferimento UTM (Universal Transverse of Mercator che è una proiezione della superfice terrestre) che viene usato dal GNSS. [Surace, L.: 1998]

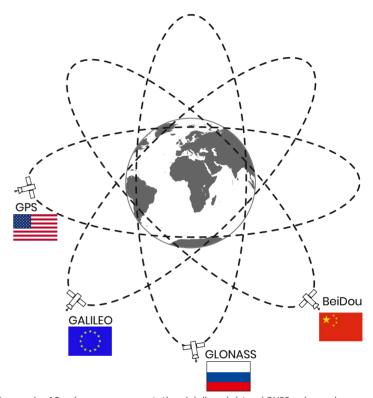


Immagine 1.3: schema rappresentativo dei diversi sistemi GNSS nel mondo.

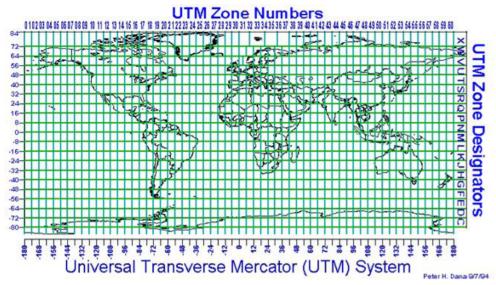


Immagine 1.4: foto del sistema di riferimento UTM. Fonte: Mondogeo

Oltre al GNSS, vi è anche un tipo di sistema potenziato di quest'ultimo il DGNSS (Differential Global Navigation Satellite System).(immagine 1.5)

Esso è un posizionamento differenziale tramite un ricevitore mobile (detto anche rover) che riceve dei segnali dai satelliti GNSS con annesse delle correzioni che arrivano da una stazione con posizione nota (stazione di riferimento); e può essere svolto con:

- Metodo statico: che viene usato per la misurazione dei vertici per la rete topografica.
- Metodo cinematico: nominato RTK (Real Time Kinematic) viene usato per i rilievi in dettaglio in tempo reale; riceve anche un segnale da una coppia di ricevitori geodetici a doppia frequenza che riescono a far ottenere posizionamenti GPS precisi al cm (per questo viene utilizzato per i rilievi in dettaglio). (immagine 1.6)

[Cina, A.; 2014]

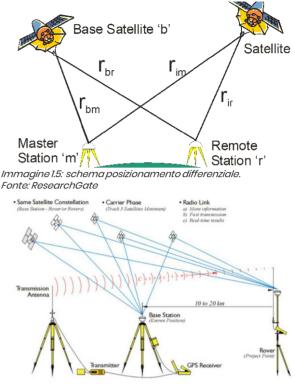


Immagine 1.6: schema posizionamento RTK. Fonte: Cina. A. (2014).

1.4.2 Misure topografiche tradizionali di vertici e punti di controllo

La stazione totale è lo strumento tradizionale che viene utilizzato in topografia, permette di misurare simultaneamente gli angoli azimutali, zenitali, le distanze e di collegare i punti misurati in un sistema di coordinate già definito. In poche parole, misura diversi punti appartenenti all'oggetto, memorizza angoli e distanze per poi archiviarli come coordinate che saranno utilizzate durante la fase di elaborazione dei dati. Sostanzialmente essa è formata da cinque elementi fondamentali:

- Alidada: a forma di "U" che controlla la rotazione lungo l'asse verticale.
- Cannocchiale topografico: è uno strumento ottico, è

collegato fra l'alidada che ne permette solo la rotazione lungo l'asse orizzontale. Il cannocchiale ha anche un proprio asse di rotazione chiamato asse di collimazione.

- Basetta: che funge da livella, è posizionata tra stazione e la base di collegamento.
- Base di collegamento: è interposta tra il treppiede e la basetta.
- Treppiede: è il componete portante che ha funzione di sorreggere e stabilizzare la stazione totale su di un vertice della rete topografica.

Di solito la stazione totale viene usata, in fotogrammetria e TLS, per misurare i GCPs (punti di controllo). Questi GCPs vengo misurati utilizzando degli appositi marker che vengono applicati sull'oggetto da rilevare e hanno la funzione di evidenziare questi punti (per renderli facilmente visibili dal punto di vista radiometrico). Non sempre però è necessario applicare i marker, infatti, nel caso in cui l'oggetto da rilevare fosse caratterizzato da punti naturali facilmente distinguibili i marker sono superflui. La funzione principale dei marker è quella di rendere il rilievo fotogrammetrico più accurato, infatti vengono utilizzati per georeferenziare l'intero rilievo e permettono di poter unire prodotti ricavati da tecnologie diverse (per esmpio di unire nuvole di punti provenienti da diverse tecnologie come UAV e TLS). [Bianchini, M.: 2008]



Immagine 1.7: esempio di stazione totale (Leica). Fonte: FARAD srl.

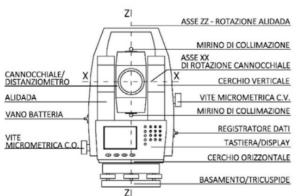


Immagine 1.8: schema elementi della stazione totale. Fonte: 3eye GeoMApping.

1.4.3 La Fotogrammetria e i suoi sviluppi

La fotogrammetria: "Arte, scienza e tecnologia in grado di ottenere valide informazioni degli oggetti fisici e dell'ambiente, attraverso il processo di raccolta, misura e interpretazione di immagini (fotografiche o digitali) e rappresentazione analogica o digitale dei modelli di energia elettromagnetica derivanti da sistemi di rilevamento (camere fotografiche o sistemi a scansione) non a contatto con gli oggetti"

[Germanasca, M. A.; 2004]

La Fotogrammetria è un metodo del rilievo, utilizzato per studiare oggetti di qualsiasi dimensione ed è basato sull'acquisizione delle immagini e consente di studiare e rilevare l'oggetto senza dover necessariamente avere un contatto diretto con esso; è una scienza non indipendente ed ha quindi bisogno della topografia per la misura di punti che consentono di assegnare una scala di riferimento, oltre che georiferire il modello dell'oggetto.

[Kraus, K.; 1994]

La fotogrammetria si fonda sui concetti della prospettiva centrale dei fotogrammi. L'oggetto da rilevare viene proiettato su di un piano bidimensionale generando una corrispondenza tra diversi punti appartenenti all'oggetto. La prospettiva in questo caso è detta centrale poiché i raggi di proiezione convergono tutti in un solo punto (il centro di proiezione) paragonabile all'obiettivo di una fotocamera.

[Spanò, A.; 2018]

Se si usa una sola immagine, i punti immagine sono proiettati su un piano bidimensionale se l'oggetto da rilevare è piano; se al contrario l'oggetto è tridimensionale bisogna utilizzare come minimo due immagini stereoscopiche. Quindi, dall'intersezione dei raggi omologhi, di un medesimo punto dell'oggetto generati da due diversi fotogrammi, attraverso l'utilizzo di due prospettive centrali di uno stesso punto, si potrà ricavare la posizione di quest'ultimo nello spazio. Ripetendo questo processo per altri punti dell'oggetto si potrà generare un modello tridimensionale.

[Kraus, K.; 1994]

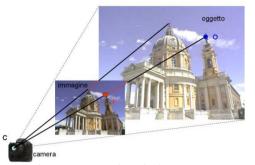


Immagine 1.9: esempio di fotogramma con prospettiva centrale. Fonte: Lingua, A. Marenchino, D. (2007).

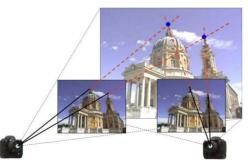


Immagine 1.10: immagine rappresentativa dei principio della fotogrammetria. Fonte: Lingua, A. Marenchino, D. (2007).

1.4.2.1 Fondamenti analitici della Fotogrammetria

Il principio fondamentale della fotogrammetria è quello di stabilire una relazione geometrica tra le immagini catturate dalla fotocamera e la scena reale nel momento in cui le fotografie sono state immortalate. Ciò è possibile solo se si conoscono i parametri di orientamento interno ed esterno della camera che rappresentano le relazioni tra il punto del centro di presa, il punto oggetto e il punto immagine, che definiscono insieme le equazioni di collinearità.

[Bertocci, S.;Bini, M. 2012]

- I parametri interni tengono conto delle caratteristiche proprie della fotocamera (per esempio distorsione radiale dell'obiettivo, posizione del punto principale e la lunghezza focale); i parametri di questo orientamento sono rappresentati da: la distanza (c) tra il centro di presa e la sua proiezione sul piano dell'immagine, e da due coordinate del centro di presa sul piano immagine (ξ0,η0).
- I parametri esterni definiscono i parametri spaziali della fotocamera in un sistema di coordinate prestabilito. Vengono definite così la posizione dei centri di presa nello spazio e l'orientamento dei fotogrammi.

Tramite la Fotogrammetria tradizionale vengono utilizzate, quindi, le equazioni di collinearità per determinare le coordinate tridimensionali di punto (visibile in almeno due fotogrammi) tramite alla triangolazione fotogrammetrica o bundle adjustment grazie alla conoscenza dei parametri interni ed esterni sopracitati. [Spanò, A.; 2018]

1.4.2.2 La Fotogrammetria digitale

Con lo sviluppo del campo digitale si è passati all'utilizzo di immagini non più fotografiche ma numeriche, caratterizzate da una matrice di pixel. I pixel vengono processati tramite computer avviando una procedura di fotogrammetria automatizzata.

Il sistema fotogrammetrico si avvale di due fasi separate:

- Di acquisizione: tramite l'acquisizione di foto attraverso uno schema prestabilito e trasformate in formato digitale con il fine di conoscere i parametri di orientamento interno per la fase che segue.
- Di restituzione: la fase in cui i fotogrammi vengono orientati in maniera automatizzata tramite procedure di image matching (correlazione dei punti omologhi delle foto tramite comparazione statistica dell'informazione radiometrica dei pixel) basate su tecniche di pattern recognition.

[Kraus, K.; 1994]

La prima fase risulta essere molto rilevante perché se non fosse eseguita correttamente si andrebbe a generare un risultato inattendibile. Dopodiché è possibile ottenere un modello tridimensionale fondato su nuvole di punti 3D e una mesh dell'oggetto. La tecnica più usata per l'estrazione di nuvole di punti è la SfM (Structure from Motion) che estrae dati metrici tramite le informazioni radiometriche di immagini immortalate da una camera in movimento. Questa tecnica ovviamente ha valenza metrica se ha accuratezze garantite dai GCPs, Cps e georeferenzazione.

[Verhoeven, G. 2011]

La fotogrammetria, inoltre, può essere aerea e terrestre:

- La fotogrammetria terrestre: tramite fotocamere digitali che si suddividono in "compatte" (che sono di utilizzo più comune), "reflex" (che sono quelle per uso professionale) e "panoramiche" (in grado di acquisire immagini a 360°)
- La fotogrammetria aerea: tramite fotocamere montate su piattaforme aeree (UAV, Aerei) che possono essere di formato piccolo, medio o grande. Le immagini con queste camere vengono acquisite con sensori lineari o frame.

Entrambe si basano sui principi della stereoscopia, cioè la collimazione di punti omologhi per far si che venga garantita la percezione spaziale dell'oggetto del rilievo. Perciò la restituzione è possibile solo se si hanno un minimo di due fotogrammi. [Spanò, A.; 2018]

Grazie allo sviluppo delle tecniche SfM (sopracitate) molto diffuso è stato l'utilizzo dei droni UAV (unmanned aerial vehicles) nel campo della Geomatica con la combinazione della fotogrammetria e topografia. In queste applicazioni il sistema UAV utilizza molte delle tecniche, sistemi e strumenti già citati nei paragrafi precedenti.







Immagine 1.11; 1.12; 1.13: da sinistra a destra esempi di camere: camera compatta (Sony DSC-RX100M4,), camera Reflex (Canon EOS M-50), camera panoramica (GoPro hero 9). Fonte da sinistra: Sony; Canon; GoPro

40





Immagine 1.14 e 1.15: a sisnistra esempio di acquisizione fotogrammetrica tramite aereo; a destra esempio di drone (Mini Mavic).

Fonte da sinistra: SAN-LO aerial surveys; HORUS dynamics.

Si richiede infatti l'utilizzo di sensori di posizionamento GNSS, sensori IMU (Inertial Measurement Unit) e camere digitali. I droni generalmente sono costituiti da un telaio, delle eliche, da motori e una camera; questi permettono al drone di volare e di effettuare foto o video dell'oggetto d'interesse.

Gli UAV possono essere pilotati tramite radiocomando oppure possono eseguire un percorso prestabilito tramite autopilota (avendo integrato i sistemi GNSS e IMU).

[Chiabrando, F. et al; 2013]

1.4.4 II LiDAR

I laser scanner, utilizzano la tecnologia Lidar (Light Detection and Ranging), derivano da sistemi di misurazione di distanze. Il funzionamento dei laser avviene tramite l'incidenza di raggi laser sull'oggetto da rilevare.

Si suddividono in diverse tipologie: laser scanner aereo, LiDAR terrestre, laser scanner mobile.

- Ilaserscanneraereivengonoinstallatisuaereioelicotteriper consentire di acquisire dati durante il volo. Sono composti da tre componenti principali: sistema di memorizzazione dati, trasmettitore e ricevitore che servono per misurare coordinate 3D di tutti i punti del territorio da scansionare grazie allo spostamento e la rotazione del sensore. Come gli UAV anche i laser scanner aerei hanno bisogno di un dispositivo GPS e IMU in modo tale da conoscere la posizione in tempo reale. Spesso a questo tipo di sistema viene associata una fotocamera per estrapolare 3D texturizzati e ortofoto.
- I laser scanner terrestri invece sono utilizzati per le acquisizioni e non possono essere istallati su dispositivi mobili. Essi si suddividono in due categorie diversificate per portata massima, precisione e modalità di acquisizione: distanziometrici e triangolatori. I primi hanno una precisione al cm perché riescono a garantire portate maggiori, fino a 1 km ed hanno caratteristiche molto simili alle stazioni totali (solo che i punti da rilevare non possono essere

scelti dall'operatore visto che è uno strumento totalmente automatizzato); i secondi invece hanno portate minori e quindi riescono ad essere precisi fin sotto al mm.

[Biasion, A.; et al; 2015]

• I laser scanner mobili sono anch'essi degli MMS (Mobile Mapping System). Un esempio di laser scanner mobile è il MMV (Mobile Mapping Vehicle) che è formato da un veicolo (per esempio una barca, un treno o più semplicemente un'automobile) che acquisisce dati che arrivano da sensori come GNSS, IMU, camere digitale e LiDAR. [Chiabrando, F. et al: 2013]

Negli ultimi anni sono nati nuovi sistemi MMS, molto compatti e leggeri dotati di tecnologia SLAM (Simultaneous localization and mapping) in grado di rilevare anche zone al chiuso e difficilmente accessibili garantendo accuratezza anche senza usare il GPS. Uno dei limiti principali, però, della tecnologia SLAM è che per ottenere una scansione ottimale bisogna eseguire percorsi chiusi. [Sammartano, G.: et al. 2018]

Un esempio di strumento che utilizza la tecnologia SLAM è il nuovo sistema Swift (immagine 1.19) ideato da FARO; è un tipo di tecnologia integrata formato da tre componenti connessi fra loro:

- Laser scannar statico della serie S (che lavora autonomanete)
- ScanPlan: equipaggiato di laser che funziona con la tecnologia SLAM (anch'esso lavora autonomamente)
- Uno smartphone per collegare per via WI-FI i due sensori.

I tre componenti sono posizionati su di un carrello leggero guidato dall'addetto che camminando sposta il carrello per l'utilizzo. [Bonfanti, C.; et al 2021]

42







Immagine 1.16; 1.17; 1.18: da sisnistra esempio delle tipologie di acquisizione laser: di tipo mobile (montato su di un'automobile), di tipo aereo (montato su di un elicottero), di tipo terrestre (laser dell'azienda FARO). Fonti da sinistra: geotopo; AEROLASER; LASER SCANNING EUROPE.



Immagine 1.19: sistema Swift. Fonte: : Bonfanti, C.; Patrucco, G.; Perri, S.; Sammartano, G.; & Spanò, A. (2021).

CAPITOLO 2

IL FERROCEMENTO E LE STRUTTURE RESISTENTI PER FORMA

2.1 L'innovazione del secolo: il cemento armato

L'arco temporale che si svolge fra le due guerre Mondiali, a livello architettonico, è conosciuto come "Movimento Moderno", che definisce quell'insieme di opere prodotte da diversi movimenti architettonici che vanno dallo stile Liberty di inizio secolo fino al Futurismo.

In Italia negli anni Trenta del Novecento si sviluppano temi legati alla nascita del partito fascista e nascono nuove esigenze connesse ai problemi igienici, alla salute, alla residenza sociale a basso costo e alle nuove costruzioni dovute allo sviluppo in campo industriale. Oltre i temi sopraelencati, in questo periodo, un altro tema trattato è quello dei grandi centri storici delle città italiane più importanti. Durante quest'epoca, dal punto di vista architettonico, si è aperti alla sperimentazione, alla diffusione della nuova architettura e vengono pubblicate anche le prime riviste architettoniche come "Domus" e "Casabella".

[Canzoni, A.; 2010]

In questo secolo viene introdotto, un nuovo materiale da costruzione, il cemento armato che pian piano diviene una vera e propria centralità in campo costruttivo di tutto il mondo.

All'inizio degli anni '50 del Novecento in Italia viene introdotto il termine di "Ingegneria Strutturale" che si è diffuso proprio con lo sviluppo di questo nuovo materiale.

Questo fenomeno trova la partecipazione attiva dell'imprenditoria italiana e delle scuole che focalizzano il proprio sostegno per lo sviluppo di nuove tecniche che vedono l'impiego del cemento armato. L'utilizzo e la sperimentazione di questo materiale introduce un nuovo modo di progettare e fa sì che si sviluppino anche i grandi brevetti sia importati che italiani.

L'utilizzo del cemento armato accresce ancora di più durante il periodo dell'autarchia ("bastare a sé stessi per non sentire il bisogno dei beni materiali") in cui si ha l'esigenza di diminuire l'utilizzo di ferro da armatura stimolando la ricerca scientifica ad intensificare lo studio del comportamento statico del calcestruzzo armato. Le costruzioni che venivano utilizzate come campo di sperimentazione erano le grandi infrastrutture ed edifici con

coperture con grandi luci in cemento armato (ponti in cemento precompresso e grandi coperture sottili). Fu in questi anni che per approfondire la conoscenza di questo materiale si iniziò a superare la teoria elastica con lavori sulla deformabilità plastica introducendo la teoria elasto-plastica (da studiosi come Colonetti, Danusso e Giannelli).

Molto simile al calcestruzzo armato è il ferrocemento, la sua composizione di base è una malta ricca di polvere di cemento Portland con aggregati molto fini. L'acqua, invece, viene dosata in modo da avere una consistenza plastica. Dopodiché, vengono formati diversi strati di reti metalliche su cui viene adagiata la malta cementizia.

[Desideri, P.; Nervi, P. L.; Positano, G.; 1979]

La prima volta che viene introdotto il termine ferrocemento è nel 1852 da uno stralcio del brevetto sperimentato da Joseph-Louis Lambot:

"La mia invenzione mostra un nuovo prodotto che aiuta a rimpiazzare il legname lì dove è maggiormente danneggiato da umidità, come pavimentazioni in legno, serbatoi di acqua, vasi di piante ecc. la nuova sostanza consiste in una rete di cavi o barre metalliche, connesse o formate in modo da avere una maglia flessibile. Do a questa reta la forma il più possibile simile all'oggetto finale che voglio creare. Dopo getto il cemento in modo da ricoprire la rete" 1

Nota 1: Brevetto "ferrocèment" di Josephin-Louis Lambot,1852.

2.2 Il brevetto di Pier Luigi Nervi "il ferrocemento"

Fu, invece, nell'aprile del 1943 che Pier Luigi Nervi rilascia il brevetto del "ferrocemento" (BREVETTO N° 406296, 1943).

Quest'ultimo si differenzia dal cemento armato in base alla quantità di acciaio che si va ad inglobare nel materiale; infatti, il cemento armato è costituito da una quantità più elevata di materiale cementizio rispetto all'acciaio. Con il suo brevetto, invece, Nervi inverte proprio queste proporzioni.

[lori, T.; 2009]

Il pacchetto di questo nuovo materiale è composto da diversi strati di rete metallica di forme differenti e barre di armatura. L'elemento in ferrocemento sarà molto sottile con spessori che vanno dai 12 mm ai 60 mm e all'interno saranno presenti almeno due strati di rete metallica.

[Desideri, P.; Nervi, P. L.; Positano, G.; 1979]

La soletta che viene ricavata tramite questi procedimenti, oltre ad essere molto sottile è anche molto resistente, elastica, flessibile e ha dei costi molto bassi non richiedendo l'utilizzo di casseforme.

Per di più, Nervi dimostra che tra due strutture aventi stessa luce, una in ferrocemento e l'altra in cemento armato, grazie allo spessore ridotto del ferrocemento, viene impiegato molto meno acciaio rispetto al cemento armato.

[lori, T.; 2009]

Nervi dice del ferrocemento: "il fatto di poter creare pietre fuse, di qualunque forma, superiori alle naturali poiché capaci di resistere a tensione, ha in sè qualche cosa di magico. [..] Con tale materiale i campi della fantasia vengono allargati senza limiti...". ²

Nota²: Nervi, P. L., Neri, G. (2014) Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato, op cit., pp 77-78

In tutti i casi affrontati da Nervi, lo spessore della soletta in ferrocemento finita era di poco superiore a quello dell'acciaio usato per l'armatura; quel poco da rivestire il pacchetto metallico. Le caratteristiche più importanti di questo brevetto sono fondamentalmente due:

- Allungabilità e infessurabilità acquisite dalla malta cementizia e dovute dalla suddivisione e propagazione dell'armatura metallica.
- Applicazione della malta senza necessità di casseforme, poiché rimane perfettamente aderente alle reti metalliche.

Fu proprio grazie a queste due caratteristiche che l'ingegnere inizia a sperimentare diversi campi di applicazione per il nuovo materiale, tra cui quello navale. Nel 1943, Nervi avviò sotto la sorveglianza del Registro Navale italiano degli studi, per stabilire dati numerici fondati. Si focalizzò sulla resistenza agli urti, sull'allungabilità e caratteristiche meccaniche. Infatti, questi approfondimenti portarono alla luce che la resistenza delle solette poteva arrivavare fino allo spessore di 3 cm; ma anche che, una volta arrivato a rottura il materiale non subiva uno squarciamento ma uno sfibramento delle reti con una screpolatura diffusa del cemento i cui pezzi, tuttavia, restavano collegati tra loro mantenendo una certa consistenza impedendo anche il passaggio di acqua (molto importante per lo studio in campo navale). A seguito di questi studi si sono susseguiti una serie di progetti proprio in questo campo.

[Nervi, P. L.; 2010 (ristampa del 1965)]

Per quanto riguarda il campo architettonico, come prima realizzazione con il ferrocemento fu realizzato, nel 1946 con scopo sperimentale e con la firma della Società Nervi e Bartoli, un capannone nel magazzino di Roma di Nervi. In questo progetto le chiusure orizzontali e verticali hanno uno spessore di 3 cm e acquistano resistenza per effetto del corrugamento.(immagini2.1; 2.2; 2.3)

Negli anni successivi Nervi impiega, per tutte le sue future opere, il ferrocemento arrivando anche alla costruzione di una copertura voltata e ondulata con una luce di 98 m: la volta del complesso di Torino esposizioni. (immagine 2.4)

[Bianchino, G.; Costi, D; 2012]







Immagine 2.1, 2.2 e 2.3: foto del progetto sperimentale in ferrocemento del capannone progettato dalla Nervi e Bartoli. (Iori, T. Nervi, P.L. 2009).

Fonti da sopra e poi da sinistra: Espazium; flickr; structural design.



Immagine 2.4: foto della volta a botte di Torino Esposizioni. Fonte: Artribune

2.3 La prefabbricazione del ferrocemento

Con il diffondersi di queste nuove tecniche e materiali, anche il procedimento costruttivo inizia a cambiare e viene introdotta la prefabbricazione strutturale.

[lori, T.; 2009]

Questo nuovo procedimento consiste nell'unire staticamente i diversi elementi cementizi prefabbricati, per garantire la costruzione di un complesso resistente.

[Nervi, P. L.; 2010 (ristampa del 1965)]

Inoltre, l'eliminazione delle casseforme in legno permette anche di sostenere economicamente l'esecuzione anche di strutture curve e complicate; ed è proprio questo che spinge Nervi verso l'utilizzo e l'approfondimento delle tecniche del ferrocemento.

[Nervi, P. L.; 1980]

Questo perché vengono utilizzate un numero limitato di matrici per l'esecuzione di un grande numero di elementi (riducendo anche il peso economico) differentemente dal cemento armato che ogni cassaforma serve per un solo utilizzo.

Per quanto riguarda, tecnicamente, l'unione statica dei diversi "pezzi" avviene tramite la saldatura elettrica degli elementi in ferro e poi dal getto di conglomerato ad alta resistenza. L'utilizzo anche di particolari cure, come la scalpellatura delle superfici, bagnare e spalmare con la baiocca di cemento nel momento del getto del nodo, fanno sì che venga assicurata un'aderenza quasi vicina alla perfezione tra i conglomerati dei diversi elementi.

Un punto cruciale dell'utilizzo della prefabbricazione è caratterizzato dallo studio del montaggio dei vari elementi che viene fatto in base alle attrezzature in possesso. Viene studiato come devono essere sollevati, messi in posa e quali mezzi di trasporto utilizzare per il cantiere. Quindi, per le strutture in ferrocemento, rispetto anche ad altri materiali, occorre non solo uno studio di progettazione dell'opera in se ma anche di tutta la fase di trasporto, assemblaggio e montaggio che è curata nei minimi dettagli.

Oltre ai pregi tecnici della prefabbricazione, Nervi ne mette in evidenza anche le sue caratteristiche estetiche in campo architettonico che nascono comunque dalle condizioni della

51

prefabbricazione:

- Leggerezza strutturale
- Ritmo caratterizzato dall'accostamento di elementi identici tra loro.

[Nervi, P. L.; 2010 (ristampa del 1965)]

Il passaggio dal metodo costruttivo "tradizionale" di quell'epoca al metodo della prefabbricazione lo abbiamo grazie alla realizzazione di Nervi di quattro Aviorimesse; possiamo suddividere queste ultime in due serie le prime due tra il 1935-1938 e le seconde tra il 1939-1942. (immagini 2.5; 2.6; 2.7; 2.8)

Le strutture della prima serie erano state progettate per coprire grandi luci e il metodo costruttivo utilizzato è il medesimo per entrambe; formate da giganti volte a padiglione reticolari e caratterizzate dall'intersezione ortogonale di un doppio sistema di archi identici e il collegamento con il terreno avveniva tramite un sistema di pilastri inclinati. Queste prime due strutture furono costruite con la classica tecnica del cemento armato, cioè, con una cassaforma in legno (date le gran dimensioni era molto complessa ed economicamente poco sostenibile) posizionando poi l'armatura ed infine il getto in opera del cemento.

La seconda serie è caratterizzata da altre due Aviorimesse di identica forma esterna ma queste ultime segnano il passaggio di Nervi dal metodo costruttivo "tradizionale" al metodo della prefabbricazione.

[Solomita, P.; 2012]



Immagine 2.5: foto dell'aviorimessa di Orbetello della fase di cantiere (della seconda serie). Fonte: fontecedro



Immagine 2.6: foto dell'aviorimessa di Orbetello della fase di cantiere (della seconda serie). Fonte: fontesedro



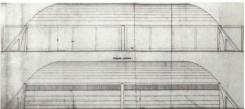


Immagine 2.7: disegni di progetto dell'aviorimessa, pianta della copertura e prospetti anteriore e posteriore. Entre fontecedio.

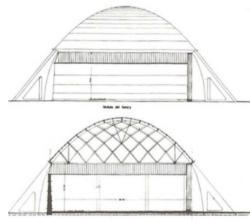


Immagine 2.8: disegni di progetto, prospetto late corto e sezione trasversale. Fonte: fontecedro

2.4 Le "strutture a guscio"

Dopo aver effettuato le prime sperimentazioni con il ferrocemento, Nervi in contemporanea inizia a fare delle riflessioni sul tipo di resistenza per forma. Le strutture resistenti per forma sono quelle particolari conformazioni geometriche dove una specifica curvatura consente di aumentare la capacità resistente senza ricorrere ad alcun aumento di sezione e quindi di materiale. [Salvadori, M., & Brandolini, S.; 2009]

Spesso nelle sue opere fa riferimento a forme organiche naturali, dovute dalla conformazione che assumono. Queste strutture sono caratterizzate da uno spessore sottile e una certa curvatura che spesso utilizza per coprire grandi luci.

[Solomita, P.; 2012]

Questo tipo di struttura viene detto "struttura a guscio" definite dalla curvatura di "Gauss", grazie alla quale Nervi ne definisce aspetti geometrici e caratteristiche portanti. Le tipologie di forma principali che utilizza si suddividono in due categorie: [Nervi, P. L.; 1980]

- Quelle di rivoluzione: che ottiene facendo ruotare una curva attorno un'asse verticale dando origine a superfici di tipologia sferica, conica o parabolica (per esempio la cupola).
- Quelle di traslazione: che ottiene facendo traslare una curva lungo un'asse orizzontale dando origine a superfici di tipologia parabolica cilindrica o ellittica (per esempio le volte)

Sono queste le due tipologie principali che Nervi utilizza per le coperture delle sue strutture, che si rifanno principalmente all'impianto circolare e basilicale. [Solomita, P.: 2012]

Alla base dei suoi studi della forma troviamo sempre la conformazione ad arco che caratterizza le sue sezioni: cupole, volte e coperture geodetiche. (immagine 2.9) La forma dell'arco è ricorrente perché gli permette di superare il vincolo delle grandi luci seppur utilizzando uno spessore molto ridotto. Quindi che si tratti di una cupola o di una volta, Nervi fa sempre riferimento alla forma di un arco dal profilo parabolico, anche se solo per approssimazione.

Per quanto riguarda la cupola, gli archi che la compongono potremmo paragonarli ad una serie di meridiani; questi si sviluppano su di una base circolare e convergono nel punto più alto della cupola. La differenza principale che si ha tra l'arco e la cupola:

L'arco se sottoposto a carico parziale scaturisce tensioni flessionali che si spalmano su tutta la superficie.

La cupola invece tramite i "meridiani" genera una struttura monolitica (resa solida dall'effetto meridiani e paralleli) che ostacola la generazione di rilevanti tensioni flessionali. [Solomita. P.: 2012]

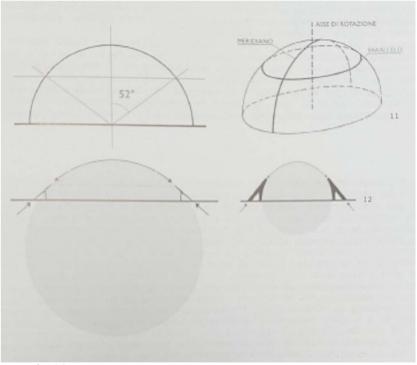


Immagine 2.9: esempio di geometria utilizzata da Nervi con la tipologia dei meridiani e paralleli con annessi esempi di strutture. Fonte: Solomita, P.; 2012.

Inoltre, per quanto riguarda le strutture in cemento armato, il comportamento dell'arco e della volta influenzano in modo diverso il rapporto tra spessore e raggio.

- Per l'arco il rapporto oscilla tra 1/20 e 1/30
- Per la cupola, invece il rapporto oscilla tra 1/200 e 1/300

[Salvadori, M., & Brandolini, S; 2009]

La scelta di utilizzare strutture a guscio potrebbe essere giustificata dal fatto che se soggette a carico rispondono con un comportamento di tipo funicolare; cioè, se viene applicato un carico verticale lungo i meridiani la forza che agisce è di compressione. Le superfici di queste strutture dette a "guscio" sono di solito caratterizzate da nervature, questo fa sì che possano assumere un comportamento ipertstatico.(immagini 2.10; 2.11; 2.12; 2.13)

La scelta di progettare queste coperture a membrana sottile con delle nervature è dovuta al fatto che si debbano coprire grandi luci e quindi si cerca di utilizzare il minor quantitativo di ferrocemento o cemento armato. Per di più queste nervature permettono la suddivisione della struttura in diverse parti che diventeranno poi elementi prefabbricati per l'assemblaggio in opera e donano anche un carattere rilevante a livello estetico.

[Solomita, P.; 2012]



Immagine 2.10: copertura con nervature della semicupola del complesso di torino esposizioni. Fonte: foto del candidato.

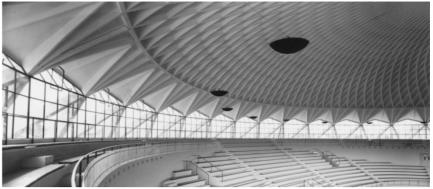


Immagine 2.11: foto della copertura con nervature del Palazzetto dello sport di Roma Fonte: Teknorina



Immagine 2.12: foto del cantiere del Palazzetto dello sport di Roma. Fonte: never endina season

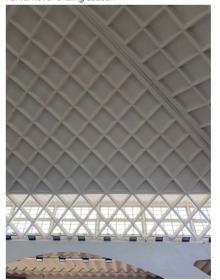




Immagine 2.13 e 2.14: copertura con nervature del Padiglione C del complesso di Torino esposizioni. Fonte: foto del candidato.

CAPITOLO 3

LA "STORIA" DEL COMPLESSO ARCHITETTONICO TORINO ESPOSIZIONI

3.1 Da palazzo della Moda a Torino Esposizioni

Il complesso di Torino Esposizioni si sviluppa all'interno dell'area verde del Parcvo del Valentino, è un edificio di grandi dimensioni composto da diversi padiglioni e viene considerato una struttura di grande importanza per la tradizione torinese.

Tra 1936 e il 1939 fu bandito il concorso per la costruzione del Palazzo della Moda, fu vinto da Ettore Sottsass Sr, che rendeva necessario l'ingrandimento del lato adiacente a C.so Massimo d'Azeglio per accogliere il nuovo polo di riferimento per le attività espositive, ricreative (come una scuola di sartoria e un museo del costume) e culturali sia provvisorie che fisse. Nella descrizione del bando era prevista anche l'opzione di mantenere il precedente edificio

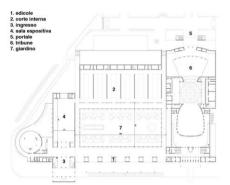


Immagine 3.1: pianta del progetto si Sottsass con elenco funzionale (1938). Fonta: SCR Piemonte

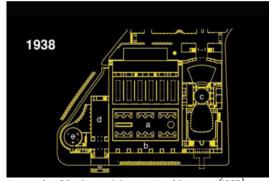


Immagine 3.2: pianta del progetto si Sottsass (1938). Fonte: SCR Piemonte.



Immagine 3.3: plastico del progetto si Sottsass del Palazzo della Moda.Fonte: SCR Piemonte.



Immagine 3.4: copertina del volume Casabella N. 133 in cui fupubblicato il progetto del 1938. Fonte: Casabella



Immagine 3.5: foto del progetto realizzato di Sottsass (1938). Fonte: san .

integrandolo al nuovo progetto, che però Sottsass decise di non tenere.

[Olmo, C.; Chiorino, C, 2010]

Nello specifico il progetto comprendeva: sale espositive, un teatro al chiuso e uno all'aperto, un ristorante e giardini interni (immagini 3.1; 3.2; 3.3 e 3.5). Il progetto fu apprezzato così tanto da essere pubblicato sulla rivista "Casabella" (gennaio 1939, N. 133). (immagine 3.4)

Per il progetto veniva richiesto di realizzare 5000 m² di sale mostra, un teatro di 2000 posti a sedere con doppio boccascena rivolto all'interno e all'esterno, stanze per accogliere il Museo della Moda, bar, ristorante, uffici e servizi vari. Propose, infatti, di ampliare l'edificio fino al doppio della sua grandezza originaria assegnando così al complesso una prima traccia dell'immagine odierna.

[Olmo, C., Chiorino, C, 2010]

Nonostante ciò, le differenze tra il progetto vincitore del bando e la conformazione attuale dell'edificio restano comunque molto evidenti specialmente per quanto riguarda la caratteristica di permeabilità del fronte su C.so Massimo d'Azeglio, ottenuta tramite porticati che davano sulle corti interne a giardino, sacrificata però, dai cambiamenti che avverranno nel corso degli anni. Il palazzo progettato da Sottsass fu terminato già nel 1938, la velocità di esecuzione è stata dovuta dalla pressione della scadenza per la



Immagine 3.6: carta dei bombardamenti di Torino (1942-1945). ASCT, Tipi e disegni, cart.68, fasc. 2v disegno 1, quadrante 3. In rosso i danni gravissimi, in rosa scuro danni gravi e in rosa chiaro danni leggeri. Fonte: Museo Torino

mostra de "L'Italia e l'autarchia" organizzata dal regime fascista. Durante gli anni della guerra l'edificio fu utilizzato come deposito armi, fino a quando non fu definitivamente danneggiato dai bombardamenti (immagine 3.6). Dopo la guerra, all'incirca dieci anni dopo l'ultimo intervento (intorno al 1948), per favorire l'organizzazione di una mostra all'interno del complesso stesso (precisamente al 31º Salone dell'Automobile, immagini 3.7 e 3.8) venne presa la decisione di ampliare nuovamente lo spazio a disposizione. Il progetto fu commissionato all'Ing. Roberto Biscaretti di Ruffia dalla nuova Società Torino Esposizioni. A Biscaretti fu affidata la ricostruzione del padiglione d'ingresso e del Teatro, invece, per quanto riguarda la costruzione del padiglione centrale fu affidata a Nervi & Bartioli. [Olmo, C.; no, C, 2010]

Il progetto di Nervi & Bartioli fu incisivo per diverse ragioni, la più significativa è caratterizzata dalla maestosa copertura del Padiglione 2 nominato anche "Padiglione Giovanni Agnelli" (immagine 3.12 e 3.13 pagine seguenti), la sala è costituita da una sottile volta in calcestruzzo avente una luce complessiva di più di 80 m donando un senso di leggerezza a una struttura così complessa.

Il nuovo padiglione fu inserito dietro alla facciata preesistente di Ettore Sottsass che fu danneggiata dai precedenti bombardamenti. Un'altra caratteristica significativa del progetto di Nervi,che sarà aggiunta 2 anni dopo (1950) è la volta del Padiglione 3 (immagini

3.9;3.10 e 3.11) che riprende il tema già affrontato da Nervi alle aviorimesse di Orbetello; l'effetto che si va a determinare grazie alle vetrate alla base della volta a botte permette l'ingresso della luce verso la sala dando anche un senso di smaterializzazione della struttura. E fu proprio l'intervento di Nervi ad incidere sull'apparato generale del complesso di Torino Esposizioni che l'ha reso identificabile fino ai giorni nostri. [Olmo, C.; Chiorino, C, 2010]

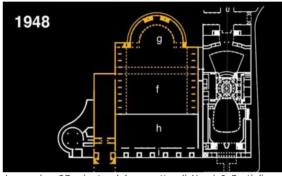


Immagine 3.7: pianta del progetto di Nervi & Bartioli con progetto del padiglione B (1948,). Fonte: SCR Piemonte.



Immagine 3.8: foto del 31º Salone dell'Automobile. Fonte: Ceravolo, R.; et al (2020)

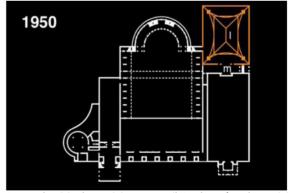


Immagine 3.9: pianta del progetto di Nervi con l'aggiunta del Padiglione C (1950). Fonte: SCR Piemonte.



Immagine 3.10: foto del Padiglione C (1950). Fonte: Ceravolo, R.; et al (2020)

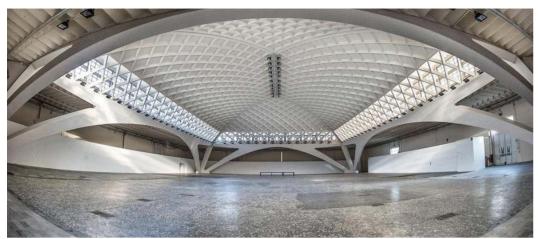


Immagine 3.11: foto del Padiglione C. Fonte: MuseoTorino

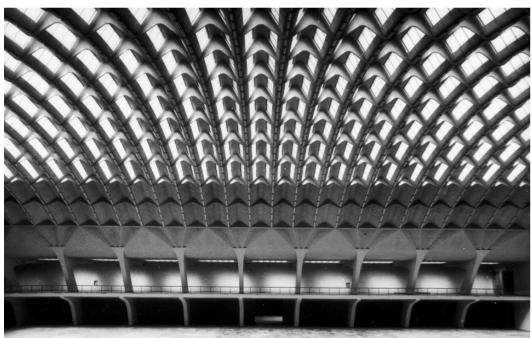


Immagine 3.12: foto del Padiglione B (detto anche Padiglione Agnelli). Fonte: artoblog.



Immagine 3.13: foto della volta dell'abside del Padiglione B. Fonte: Teknoring

3.2 Il contributo di Nervi a Torino Esposizioni

Il progetto di Torino Esposizioni fu il primo a legare Pier Luigi Nervi e la sua impresa alla committenza industriale torinese che ruota intorno al mondo FIAT ed è proprio con questo progetto che Nervi ha la possibilità di applicare su larga scala i suoi studi.

Per il progetto di Torino Esposizioni, come per quasi tutte le sue opere, Nervi è stato sia il progettista che il costruttore.

Il complesso subirà nel corso degli anni una serie di cambiamenti che,nellamaggiorparte dei casi,vedranno Nervi come protagonista. Infatti, la sua figura sarà collegata a tre di questi progetti:

- Nel 1948 con la progettazione del Padiglione B
- Nel 1950 con la progettazione del Padiglione C
- Nel 1954 con l'ampliamento di cinque campata del Padiglione B

In questo periodo Torino si trova in una fase post-bellica; quindi, la voglia di riprendersi da questo situazione fa si che si vadano a concretizzare nuovi scenari. In particolare, il mondo dell'industria dell'automobile fornisce la città di un nuovo polo espositivo: Torino Esposizioni, sulle macerie del palazzo della Moda semidistrutto dai bombardamenti (come già accennato nel paragrafo precedente).³ Le modalità e le ragioni che hanno portato alla scelta di Pier Luigi Nervi per questo compito così arduo sono sconosciute.⁴ Il progetto del Palazzo di Torino Esposizioni nasce a seguito di un concorso (emanato dalla Società Torino Esposizioni e conclusosi a giugno del 1947) il cui planivolumetrico generale fu disposto da Roberto Biscaretti Di Ruffia, ingegnere dell'industria FIAT. [Greco. C.; 2008] Il progetto venne presentato alla città di Torino come ricostruzione

Nota³: 19 maggio 1947 fu fondata la Società del Palazzo delle Esposizioni, che sarà poi chiamata Torino Esposizioni, fondata da: l'ingegnere Daniele A. De Rossi, il barone Ernesto Mazzonis di Pralafera, il dottor Teresio Guglielmone, il cavaliere Giuseppe Emanuel, l'ingegnere conte Dino Lore Totino e amministrata da Vittorio Valletta. (vedi Torino Esposizioni, 1947- 1948, pubblicazione per il decennale per la Società Torino Esposizioni, Torino 1957). A cura di Torino Esposizioni.

Nota⁴: Nei suoi articoli, Nervi, afferma che il progetto gli affidato tramite un concorso d'appalto.

e ampliamento dell'esistente Palazzo della Moda progettato da Ettore Sottsass. La proposta di progetto presentata dall'impresa Nervi & Bartoli, che vede Nervi come direttore dei lavori aiutato dall'ingegnere Vittorio Bonadè Bottino, conserva le linee generali del progetto del Palazzo della moda; il teatro a doppia platea con una porzione all'aperto e mantiene il fronte principale su Corso Massimo d'Azeglio con il ristorante circolare; un vestibolo "gigante" in vetrocemento e anche lo spazio che funge da filtro tra le vecchie e nuove sale e il corso; il cosiddetto giardino delle Danze (immagini 3.14 e 3.15) con dimensioni diverse ma comunque separato dalla via principale tramite il un lungo edificio porticato con destinazione ad uffici al piano superiore. Il salone espositivo principale, il salone B, venne collocato nella zona centrale, motivo per cui il giardino delle danze fu rimpiazzato da un altro un cortile dalle dimensioni più piccole e con a ridosso una sala espositiva più piccola (salone A).(immagine 3.18) *[Greco. C.; 2008]*

Il15 settembre del 1948, in occorrenza del XXXI Salone dell'Automobile, venne inaugurato il Salone B (una delle più grandi realizzazioni in ferrocemento) che venne poi definito "il più bel palazzo che l'Italia abbia mai costruito" e apparirà nella stampa specialistica internazionale a partire dal 1949, e troveremo il progetto anche sulla copertina di "La technique des tavaux" (settembre-ottobre 1949, N. 9-10). (immagine 3.16)

Il salone è di pianta rettangolare (96m x 71m) coperto da una volta a botte su due serie continue di pilastri verticali, due gallerie laterali su due livelli e alla fine del salone un'abside semicircolare inizialmente progettata con copertura con solaio piano.

[Greco. C.; 2008]

Il Salone B viene realizzato con due differenze sostanziali dalla Nervi e Bartoli rispetto a quello di Biscaretti: dei pilastri laterali inclinati (collocati ogni 7,5 m) che sostengono i ballatoi delle gallerie laterali e da cui si ramificano mensole, i pilastri attraversano le gallerie e poggiano su plinti sagomati (per contrastare la spinta in direzione della volta); una semicupola sottile (in alternativa alla copertura piana sopracitata) per l'abside alla fine del Salone che ha la funzione di raccordare la pianta semicircolare dell'abside e la parete terminale del salone.

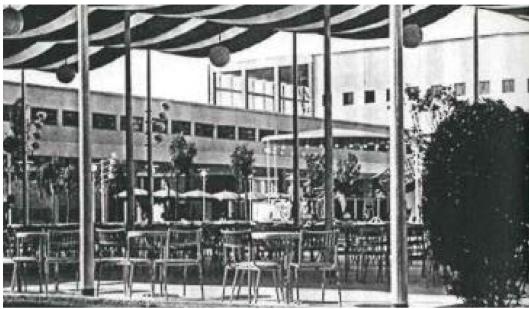


Immagine 3.14 : foto del giardino delle Danze. Fonte: Greco. C.; 2008.

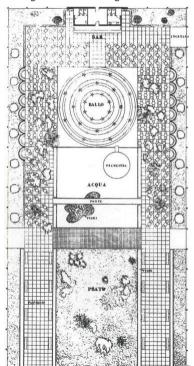


Immagine 3.15: Pianta del giardino delle Danze del progetto di Sottsass del 1396. Fonte: Greco. C.; 2008.

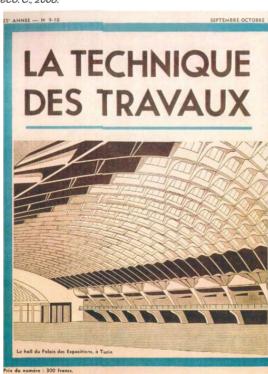


Immagine 3.16: copertina di "La technique des travaux (1949). Fonte: Torino esposinioni Getty Foundation .

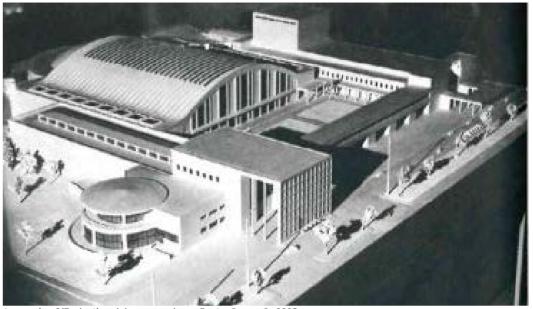


Immagine 3.17: plastico del nuovo palazzo. Fonte: Greco. C.; 2008.

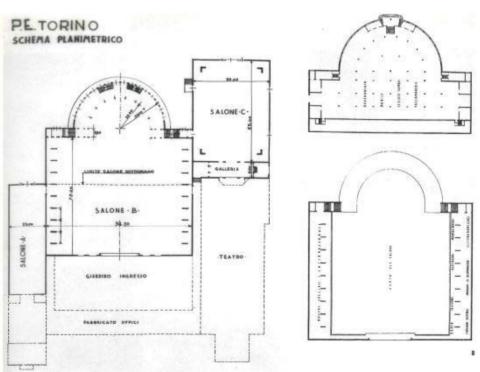


Immagine 3.18: schema planivolumetrico del progetto di ampliamento del 1947 (Nervi & Bartoli). Fonte: Greco. C.; 2008.

Per dimostrare le verifiche di calcolo della parte dell'abside, Nervi richiama un testo del 1935 "Die Rotations-schaten mit unsymmetrischer Form und Belastung", *Dischinger, F.; 1935*].

Invece, per quanto riguarda la parte degli elementi prefabbricati in opera in ferrocemento utilizzati per la copertura del salone, per l'abside e poi anche per il Salone C Nervi realizza due brevetti (uno del 1948 per strutture a guscio o membrane in cui l'elemento principale sia incurvato o sagomato, e il secondo nel 1950 per superfici curve o piane realizzate con casseri da elementi triangolari che ad opera terminata rimangono staticamente collaboranti).

[Olmo, C.; Chiorino, C, 2010]

La tecnica usata da Nervi per la cupola in ferrocemento (brevetto rilasciato da Nervi "ferrocemento"; BREVETTO N. 406296; vedi capitolo 2.2).

Viene presentata come soluzione veloce ed economica (assemblata con getti in opera di cemento privo di inerti, quasi senza casseri), con l'utilizzo di strutture prefabbricate modificando quello che viene considerato il cantiere tradizionale: assicurando monoliticità a strutture labili con il collegamento di elementi dei quali si sfrutta al massimo la mobilità durante la costruzione. Il ferrocemento, brevetto costruttivo sperimentato da Nervi, che oltre ad essere una tecnica costruttiva è considerato anche frutto dell'organizzazione in cantiere di cui siamo testimoni grazie ai diversi appunti riportati da Nervi sulle tavole da disegno (ogni particolare dei materiali veniva descritto al dettaglio; il peso la quantità, le sequenze di assemblamento ecc.), in particolare sulle tavole "Sistemazione di cantiere" e "Studi di ponteggio". (immagine 3.19)[Olmo, C.; Chiorino, C, 2010]

Il salone Agnelli è caratterizzato da due temi progettuali:

- Gli elementi prefabbricati armati che danno vita a serramenti sui lati inclinati delle onde.(immagine 3.20;3.21)
- I ventagli che sono posizionati al di sopra di ogni pilastro inclinato, sono caratterizzati ciascuno da tre onde che risolvono il giunto tra volta e trave con un vincolo a semincastro. (immagine 3.22 e 3.23)

[Olmo, C., Chiorino, C, 2010]

La semicupola (immagine 3.25), e poi anche la copertura del

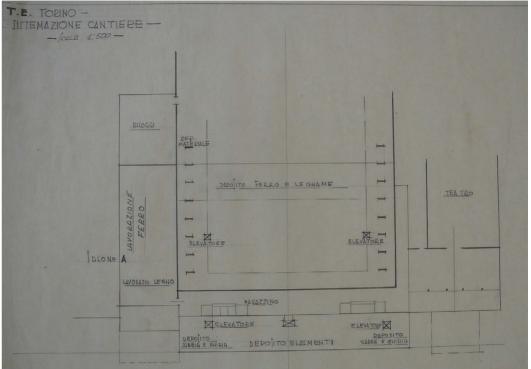
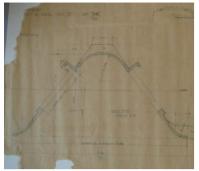


Immagine 3.19: esempio di tavola di "Sistemazione del cantiere". Fonte: CSAC

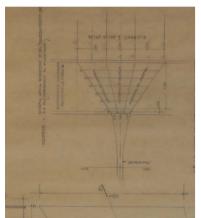
Padiglione C (del 1949 definito insieme all'Ing. Aldo Arcangeli della Nervi e Bartoli), viene costruita con forme in ferrocemento a losanghe (in stampi adibiti a casseri dello spessore di 2 cm), che vengono ridotte sempre al minor numero di tipi che Nervi ordina con tavole specifiche intitolate "Tabelle di tavelloni" (10 tipi per 392 elementi per il progetto dell'abside, immagine 3.24). Nel caso dell'abside del salone B le nervature che hanno la funzione di distribuire gli sforzi scaricandoli sulle travi di bordo e il solaio circolare piano; mentre nel caso del padiglione C i solai delle gallerie sono stati realizzati con travi ondulate in ferrocemento, in modo tale da assorbire i sovraccarichi accidentali, e rappresentando inoltre un irrigidimento attraverso il perimetro della copertura che è sostenuta da quattro arconi inclinati; inclinazione ottenuta dall'insieme della spinta della volta e dal solaio perimetrale.

Fu invece tra gli anni 1949-1950 che venne avviata la costruzione





Da sinistra immagine 3.20 e 3.21: disegno del dettaglio delle onde della volta a botte del padiglione B con i serramenti ; foto della volta. Fonti da sinistra: CSAC; Artribune.





Da sinistra immagine 3.22 e 3.23: disegno del dettaglio del pilastro a ventaglio del padiglione B ; foto dei pilastri e la voltaFonti da sinistra: CSAC; Architecturefarm.

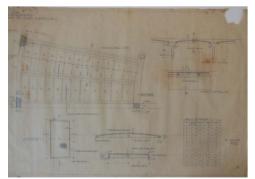


Immagine 3.24: disegno dei tavelloni della volta a botte. Fonte: CSAC



Immagine 3.25 : foto della semicupola. Fonte: costruire correttamente.

di un nuovo padiglione, detto Salone C o anche Padiglione del Ghiaccio; questa nuova costruzione doveva occupare l'area del teatro all'aperto.[Olmo, C.; Chiorino, C, 2010]

Le dimensioni del salone in pianta sono 65 x 55 m, la sua posizione è stata decisa, come per il salone precedente dall'Ing. Biscaretti e dall'ufficio tecnico di Torino Esposizioni, mentre il progetto fu affidato ancora una volta all'impresa Nervi & Bartoli.

Due furono le soluzioni principali scelte da Nervi:

- La prima presentava una copertura con volta crociera (orientata lungo il lato da 65 m), con ai lati solai piani e lunette di illuminazione.
- La seconda, invece, presentava una copertura con volta a padiglione sorretta da quattro arconi inclinati.

Fu preferita la seconda alla prima perché presentava il vantaggio di formula statica più organica e un notevole vantaggio economico. Per quanto riguarda il calcolo statico della volta scelta si è svolto considerando questa volta sia come una sottile membrana sia come una volta formata da archi semplici ognuno con una propria resistenza. Inoltre, i tempi dei lavori furono rispettati, nonostante le preoccupazioni dovute dal periodo invernale, che può portare ad un rallentamento di indurimento del materiale.

L'assemblaggio degli elementi costruttivi è stato molto veloce, le diverse parti della volta sono state messe in opera in soli tre giorni. Sia il Salone B che quello C hanno il pregio di liberare il cemento armato dalle casseforme in legno aprendo lo sguardo verso nuovi modi progettare che includono l'utilizzo di nuove tecnologie, l'organizzazione del cantiere, un modo di lavorare insieme (nello stesso posto, nello stesso momento), il perfezionamento dei metodi costruttivi (resistenza dei materiali) e il rapporto tra forma e progetto. [Nervi P. L., 1950]

Tra il 1952 e il 1954 ci fu l'ampliamento di cinque campate (immagine 3.26) nella parte ovest del Salone Agnelli eliminando così la corte preesistente e venne definito il nuovo prospetto per il quale lo stesso Nervi elaborò almeno sette soluzioni. Il progetto di ampliamento del Salone B si concluse nel 1952: le campate integrative passano da quattro a cinque, il frontone Nerviano e il coro porticato vanno a coincidere, i pilastri degli uffici soprastanti vengono demoliti e il solaio viene sostenuto dal frontone.

Nei disegni esecutivi dell'ultimo ampliamento del Salone Agnelli troviamo elementi strutturalmente classicisti: il frontone (per l'ingresso, immagine 3.27) e il timpano anteriore (per il salone) che stanno ad indicare da parte di Nervi elementi particolarmente importanti per l'ampliamento di una struttura sfruttando proporzioni e modularità.

"Il palazzo, che fin dal 1936 aveva rappresentato una svolta nelle caratteristiche urbane di un'area di confine [...] collegamento costruito ma trasparente, viene ad assumere il valore di barriera ormai urbana al limite del parco in grado di connettere in continuità la città con il Po con il salone dell'automobile del 1954".

[Olmo, C.; Chiorino, C, 2010]

Infatti, da parte della Società di Torino Esposizioni emerge in modo significativo questo impegno di voler colmare la parte sud ovest del parco del Valentino, diventando sempre più palese nel 1958, anno in cui in occasione de "L'Esposizione Italia 61" viene presentato un nuovo progetti di ampliamento per il Palazzo di Torino Esposizioni. L' ampliamento interessa ancora una volta il salone Agnelli e la costruzione di un arco di 100 m di luce in cemento armato in prospetto, una torre di uffici con struttura in acciaio e nuovi edifici destinati a servizi per il pubblico. Quest'ultimo progetto (1953) che porta la firma di Nervi, gli architetti Passanti e Perona e dell'ingegnere Ravelli (ingegnere FIAT) venne tralasciato a favore di un padiglione ipogeo progettato da Morandi. Il padiglione Morandi (o Padiglione 5) fu terminato nel 1959 (immagine 3.28), si sviluppa su un'area che nel primo Novecento ospitava il Laghetto dei pattinatori e dopo il Galoppatoio della Società Ippica Torinese. Il nuovo Padiglione fu

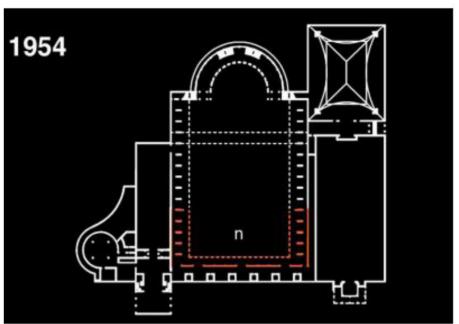


Immagine 3.26: schema ampliamento 1952-54. Fonte: SCR Piemonte.

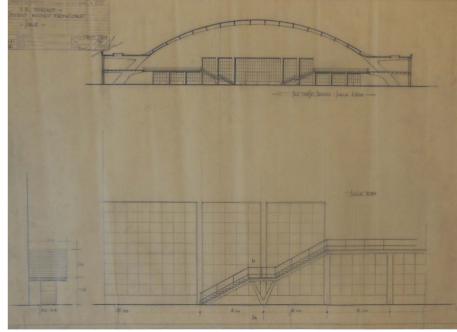


Immagine 3.27: disegno dello studio del nuovo Frontone. Fonte: CSAC

collegato al Padiglione B con una galleria sotterranea di 150 m. Durante gli anni Cinquanta l'intero complesso era divenuto manifestazione di sperimentazione progettuale, in modo particolare per quanto riguarda le soluzioni strutturali e costruttive progettate da Nervi. [Olmo, C.; Chiorino, C, 2010]

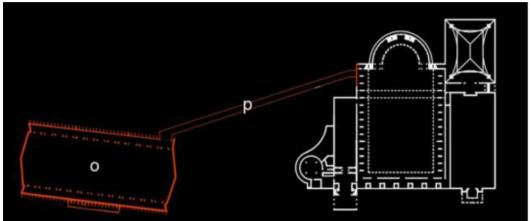


Immagine 3.28: schema ampliamento 1959. Fonte: SCR Piemonte.



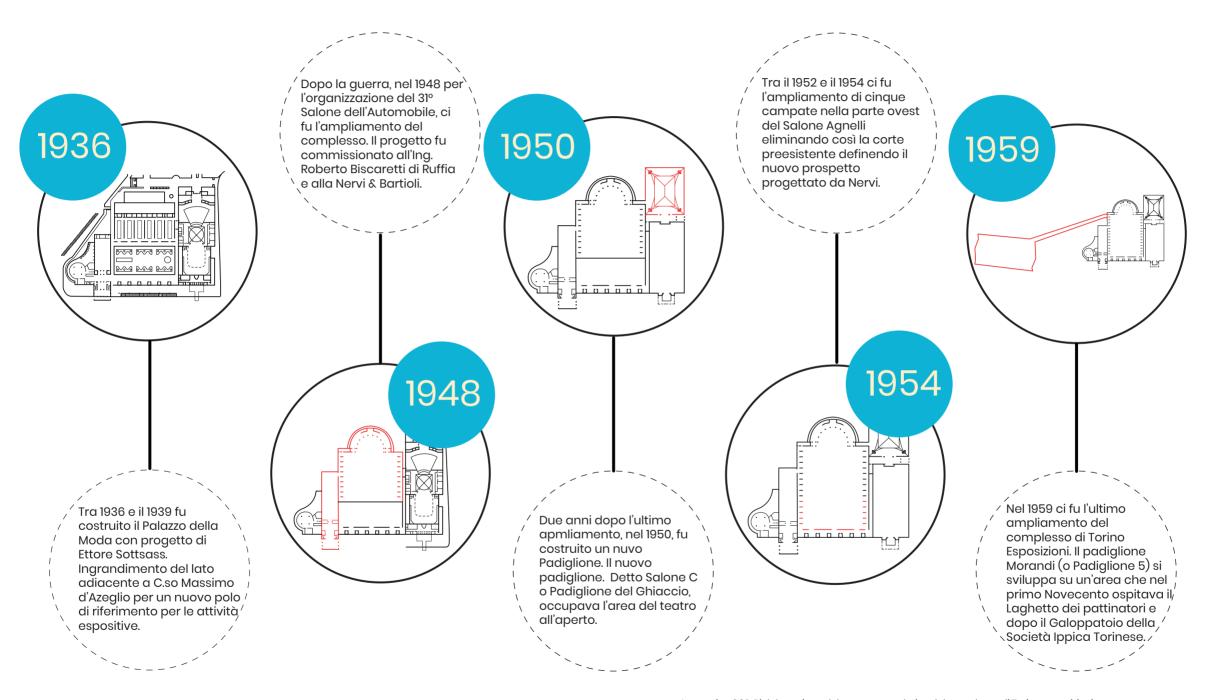


Immagine 3.30: Rielaborazione del processo evolutivo del complesso di Torino esposizioni.

3.3 Sviluppo architettonico: i Padiglioni

Nervi studia una sorta di soluzioni di "Padiglioni tipo" che saranno di ispirazione per molte delle sue opere, tra cui anche i Padiglioni di Torino Esposizioni.

Queste idee si sviluppano in seguito ad alcune vicende relative alla progettazione del "Palazzo dell'Acqua e della Luce" per l'Esposizione Universale di Roma del 1942⁵. Nervi, inizialmente, propone una torre come simbolo per Esposizione, soluzione che viene scartata quasi subito. Il progetto proposto in seguito da Nervi è un obelisco "avvolto" da un edificio a spirale a sbalzo su di una grande fontana. Di questa versione Nervi elaborò anche le tavole di progetto definitive. Però Marcello Piacenti⁶ decise di modificare il progetto in favore di una soluzione più statica. Da qui si susseguirono una serie di variazioni che si soffermano sullo spazio interno del progetto e che furono raccolte insieme in una serie di idee di diversi padiglioni.

Queste idee portano Nervi alla progettazione e invenzione di alcuni disegni di padiglioni che sono firmati tutti con la medesima data, il 18 luglio 1938. Tutti questi disegni sembrano essere caratterizzati da possibili fini espositivi pur essendo progettati senza un contesto o programma. Questi progetti possiamo definirli una sorta di campionario di progetti strutturali che Nervi nomina dal tipo A al Tipo D. (immagini da 3.31 a 3.41) Per la tipologia del Padiglione B saranno poi trovate due diverse soluzioni. [Greco. C.; 2008]

Lo studio di questi padiglioni "tipo" precede il susseguirsi dei progetti da parte di Nervi per il Palazzo di Torino Esposizioni. Non sappiamo perché abbia deciso di dedicarsi a questo tipo di studio ma possiamo considerarlo comunque alla base dei progetti che verranno.

Nota⁵: Piacentini, divenuto alla fine del 1937 Sovrintendente ai servizi Architettura a Roma, impone rapidamente la sua personale visione, monumentale e tradizionalista all'intero progetto. [Nicoloso, P.; 2018].

80

Nota ⁶ : Desideri, P.; Nervi, P. L.; Positano, G. (1979).

Infatti, come possiamo notare che il padiglione espositivo di tipo C ha una certa somiglianza con il padiglione C del complesso di Torino Esposizioni. Mentre il padiglione di tipo A introduce una copertura con andamento sinusoidale tipica degli shed industriale che affinerà poi nel padiglione B di Torino Esposizione con la parte della volta a botte.

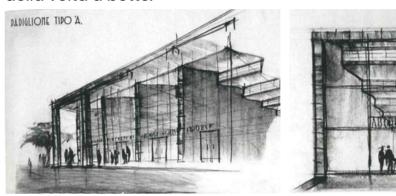


Immagine 3.31 e 3.32: viste Padiglione di tipo A. Fonte: Greco. C.; 2008.

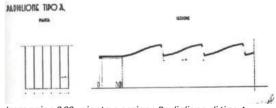


Immagine 3.33 : pianta e sezione Padiglione di tipo A. Fonte: Greco C : 2008

Il complesso di Torino Esposizioni nel corso degli anni ha subito molte modifiche, come abbiamo già accennato nei paragrafi precedenti, molto rilevanti, però, sono stati gli interventi realizzati da Pier Luigi Nervi. Gli interventi a cui si fa riferimento sono quelli che riguardano il salone B (nel 1948 con la costruzione del padiglione e la sua maestosa semicupola e nel 1954 con l'ampliamento del medesimo padiglione) e quello del padiglione C (costruzione nel 1950).

Ed è grazie a questi due progetti che Nervi riesce a dare dimostrazione della sua abilità di unire bellezza e tecnica utilizzando metodi innovativi con l'uso della prefabbricazione. Qui affina l'utilizzo di elementi modulari in ferrocemento come casseri a perdere per realizzare le forme articolate delle volte.

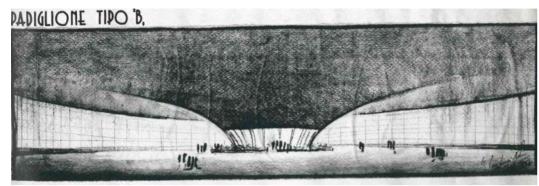


Immagine 3.34: vista interna Padiglione di tipo B, con pianta circolare. Fonte: Greco. C.; 2008.

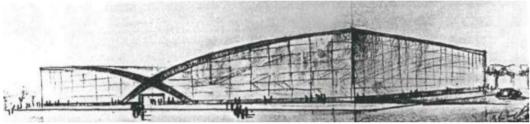


Immagine 3.35: vista esterna Padiglione di tipo B; tipologia a "X". Fonte: Greco. C.; 2008.

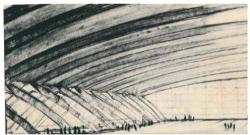


Immagine 3.36: vista interna Padiglione di tipo B; tipologia a "X". Fonte: Greco. C.; 2008.

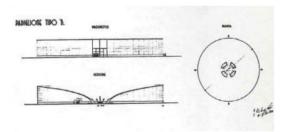


Immagine 3.37: pianta prospetto e sezione Padiglione di tipo B; tipologia a pianta circolare. Fonte: Greco. C.; 2008.

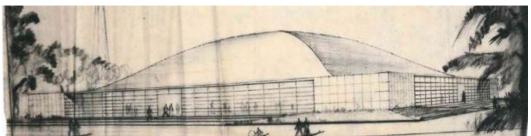


Immagine 3.38: vista interna Padiglione di tipo C. Fonte: Greco. C.; 2008.

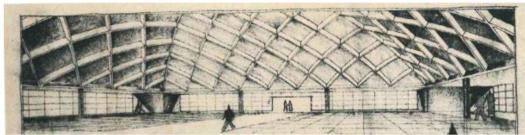


Immagine 3.39: vista esterna Padiglione di tipo C. Fonte: Greco. C.; 2008.

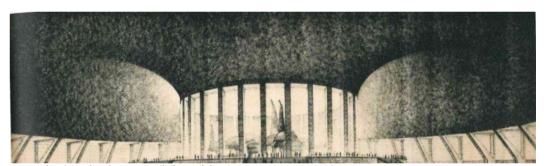


Immagine 3.40: vista interna Padiglione di tipo D. Fonte: Greco. C.; 2008.



Immagine 3.41: vista esterna Padiglione di tipo D. Fonte: Greco. C.; 2008.

3.3.1 Il Padiglione B: aspetti funzionali e costruttivi.

Il padiglione B fu inaugurato il 15 settembre del 1948; è formato da una navata coperta con una volta a botte ondulata e da un'abside coperta da una semicupola nervata.

Con il primo progetto il padiglione misura 96x110 m; dopo l'ampliamento del 1954 arriva a raggiungere una lunghezza di 155 m.

[Ceravolo, R., Lenticchia, E., Sapnò A.; 2019]

In un articolo per Atti e Rassegna tecnica della società degli ingegneri e degli architetti in Torino Nervi afferma: "L'appalto-concorso per la costruzione delle strutture portanti del nuovo Palazzo Esposizioni al Valentino (...) conteneva in sé i più interessanti problemi tecnici ed architettonici che abbia avuto occasione di incontrare nella mia non breve vita di progettista e di costruttore". [Nervi P. L., 1948]

Infatti, le problematiche del progetto erano legate sia alla proposta della disposizione generale dell'edificio concepito dell'Ing. Roberto Biscaretti sia dalla difficoltà causata dalle grandi dimensioni dell'edificio aggiunte ai termini di consegna previsti in tempi molto brevi. Il problema della breve consegna si ripercuoteva anche sulle diverse fasi costruttive, tenendo conto delle tempistiche per gli scavi delle fondazioni, il tempo restante per le costruzioni in cemento armato si svolgerà esclusivamente nei mesi invernali. Per il progetto dell'attuale cupola dell'abside in fondo al salone alla Società Nervi & Bartoli, inizialmente, fu inviata una soluzione con un solaio piano (immagine 3.42) con diversi vincoli: lasciare grandi campate libere tra i pilastri, insufficiente altezza tra le travi, difficoltà di distribuire gli appoggi armonicamente in una pianta semicircolare e il tutto tenendo conto anche della parte economica riportata nel bando dall'ente Torino Esposizioni.

Ed è proprio per tutta questa serie di vincoli e situazioni che Nervi decide di affidarsi alla pre-fabbricazione e all'utilizzo di elementi in ferrocemento; aveva già avuto modo di utilizzare queste tecniche, solo non con una simile struttura. Possiamo dire che la progettazione del padiglione B si basa su alcuni principi:

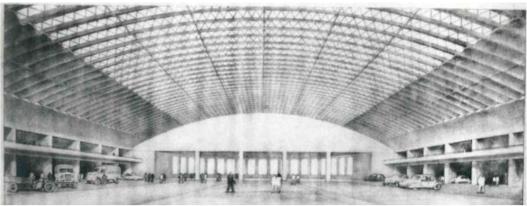


Immagine 3.42: vista interna della prima soluzione proposta da Nervi con abside coperta da solaio piano. Fonte: Greco. C.: 2008.

- La copertura con volta a botte ondulata con conci in ferrocemento pre-fabbricati. Scelta effettuata sia per l'intrinseca capacità di resistenza delle strutture ondulate, sia per la facilità di esecuzione garantita dal ferrocemento e infine anche per il risparmio economico che caratterizza questo tipo di tecniche.
- Copertura dell'abside che Nervi cambia da piana a semicupola con sistema a losanghe (immagine 3.45, 3.46 e 3.48 pagine seguenti), anch'esse prefabbricate, che aveva già sperimentato e affinato precedentemente. Come già accennato nel capitolo "Il ferrocemento e le strutture resistenti per forma" nel suo modo di progettare queste strutture di coperture, Nervi, è solito utilizzare delle geometrie che si sviluppano dall'arco (come la sfera o il cilindro). Lo studio della forma per la semicupola è stato effettuato dal Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino (immagine 3.43).
- Prefabbricazione estesa dei solai a quota (0,0), anch'essa già sperimentato dalla Società Ing. Nervi & Bartoli.

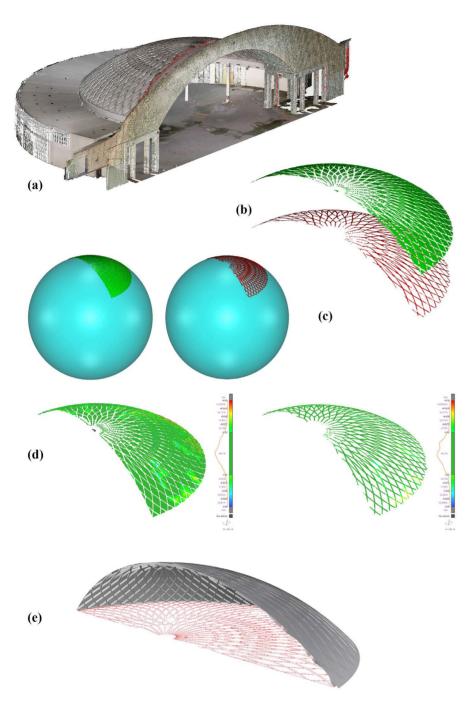


Immagine 3.43 : geometria di base della semicupola. Fonte: LAboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino

Per poter permettere la massima illuminazione, tramite infissi posizionati nella parte obliqua delle parti ondulate, al centro del salone, essendo impossibile usare validi incastri all'imposta sui pilastri, viene utilizzato un sistema statico con "un tipo di arcata a momento di inerzia crescente verso la mezzeria con funzionamento statico molto vicino a due cerniere" [Nervi P. L., 1948], cercando di unire funzionalità statica ed estetica. Un punto particolarmente delicato, descritto dallo stesso Nervi, è quello in corrispondenza tra i pilastri e la volta a padiglione che viene risolto utilizzando sulla sommità dei pilastri con tre onde che vanno a formare una sorta di ventaglio (immagine 3.46, pagina seguente), raggruppando così, per ogni pilastro tre onde della volta a botte./Nervi P. L., 1948/ Ognuno degli archi della volta a botte è caratterizzato da tredici elementi in ferrocemento (immagine 3.48) con un passo di 2,5 m, 4 m di lunghezza e altezza variabile dai 1,6 m e di spessore che varia da 0,25 a 0,15 cm (dati ricavati dai disegni del laboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino). Questi elementi sono stati armati con rete metallica e tondini, costruiti su forme smontabili in serie; assemblati in continuità su un'armatura tubolare e consolidati tramite nervature in cemento armato gettate in opera lungo i colmi e i cavi delle onde. Alcuni tondini vengono lasciati sporgere sia dalla parte superiore che inferiore degli elementi strutturali per garantire collaborazione statica tra gli elementi prefabbricati e quelli gettati in opera.

[Olmo, C.; Chiorino, C, 2010]

Per quanto riguarda la semicupola di 40 m di diametro invece, la parte resistente è caratterizzata dal solaio che la circonda, anch'esso semicircolare con 10 m di larghezza. Anch'essa è formata da elementi pre-fabbricati; le nervature sono armate e gettate con conglomerato ad alta resistenza e insieme alla soletta di 4 cm formando la struttura resistente della cupola. [Nervi P. L., 1948]

Lo spessore medio delle nervature è di circa 30 cm mentre per la soletta è di circa 10 cm (dati ricavati dai disegni del laboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino).





Immagine 3.44 e 3.45: da sinistra foto del motaggio della semicupola del padiglione B; foto dei casseri per gli elementi della semicupola. Fonte: archivio privato ing. Ravelli.



Immagine 3.46: foto interna dei pilastri al di sotto della volta a botte del Padiglione B. Fonte: archivio privato ing. Ravelli.



Immagine 3.47: foto interna della semicupola del Padiglione B, progettata da Nervi. Fonte: La Repubblica.



Immagine 3.48: foto i degli elementi curvi della volta a botta in cantiere. Fonte: archivio privato ing. Ravelli.

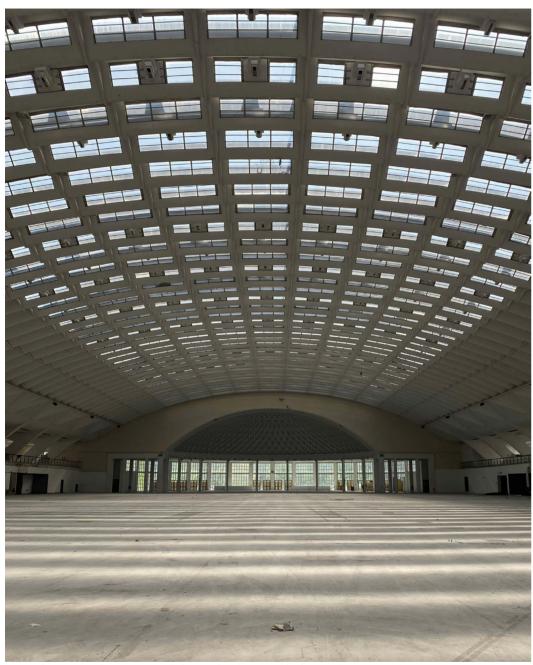


Immagine 3.49: foto interna del Padiglione B di Torino Esposizioni. Fonte: foto del candidato.

3.3.2 Il Padiglione C: aspetti funzionali e costruttivi.

Anch'esso come il padiglione B è di pianta rettangolare ma più piccolo rispetto all'altro, 65x50 m e coperto da una volta a padiglione sostenuta da quattro archi ribassati inclinati.

L'inclinazione di questi archi è stata necessaria per resistere alla risultante dei carichi derivante dalla copertura e dal peso del solaio. Gli archi si dividono sostanzialmente in due tipologie: quello che possiamo definire "lungo" che copre una luce di 56 m e quello "corto" che copre una luce di 34 m.

[Ceravolo, R., Lenticchia, E., Sapnò A.; 2019]

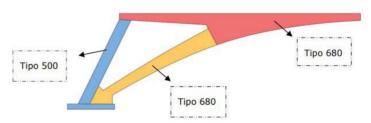


Immagine 3.50: schematizzazione dei tre step di getto del ferrocemento. Fonte: Guarino P.:2021.

Tutti gli archi sono stati realizzati in tre step (immagine 3.50) di getto e due tipologie di cemento diversi (il tipo 500 per la fondazione e il pilastro ad angolo, il tipo 680 per il telaio dell'arco e la trave d'imposta). [Torino Esposizioni; 1947–1948]

Anche la progettazione del nuovo padiglione incontra subito delle difficoltà:

- Una difficoltà architettonica-concettuale data dall'armonizzare il nuovo salone con le costruzioni precedenti facendo attenzione a non ripeterne forme e dettagli.
- Una difficoltà pratica dovuta dal breve tempo a disposizione, e oltretutto nel periodo invernale, per ultimare i lavori (inizio lavori: primi giorni di novembre, data termine lavori: 15 aprile)

91

[Ceravolo, R., Lenticchia, E., Sapnò A.; 2019]



Immagine 3.51: foto della messa in opera del Padiglione C. Fonte: archivio SBA



Immagine 3.52: foto della messa in opera del Padiglione C. Fonte: archivio SBA

Il procedimento costruttivo della copertura del padiglione C è la medesima del padiglione B (tavelloni ferrocemento disposti su centine e completati con getti di calcestruzzo per le nervature). (immagini 3.51 e 3.52)

I tavelloni utilizzati per la copertura sono stati realizzati con stampi rigidi, sui quali veniva gettato uno strato di malta cementizia per poi essere posizionata la gabbia caratterizzata da reti di armature e barre di armature con un diametro piccolo; poi il tutto veniva ricoperto con una malta.

Per quanto riguarda lo schema statico di questo Padiglione può essere considerato in modo molto semplice: la reazione trasmessa dalla volta a padiglione lungo il suo perimetro viene riportata alle fondazioni tramite i quattro arconi inclinati sopracitati. Tenendo conto, però, di sensibili spostamenti dovuti dai carichi accidentali si è dovuto ricorrere anche ad un elemento resistente orizzontale: il solaio perimetrale. Questo solaio è formato da travi ondulate in ferrocemento con interasse di 94 cm e una soletta (gettata in opera) spessa 4 cm. Queste travi sono "affiancate l'une alle altre e collegate superiormente con una soletta". [Nervi P.L. 1950]

"Per il salone in questione il rendimento del sistema della prefabbricazione è stato sfavorevole per colpa dei tempi ridotti a disposizione per la costruzione". [Nervi P.L., 1950] Le difficoltà dovute dalla prefabbricazione nei mesi invernali hanno portato un rallentamento provocato dalle basse temperature che aumentano le tempistiche di indurimento. Infatti, in questo caso è stato necessario riscaldare l'ambiente tramite delle stufe che hanno contribuito anch'esse al fattore economico. Dopo la costruzione del padiglione Nervi registrò il Brevetto N. 465636 il 19 maggio 1950 dal titolo "Procedimento edilizio per la realizzazione di superfici portanti piane o curve costituite di griglie di nervature in cemento armato, eventualmente rifinite con lastre di cemento tra le nervature". Questo brevetto con il brevetto N. 445781 (26 agosto 1948) saranno usati da Nervi negli anni successivi fino a diventare una caratteristica del progettista di fama mondiale. [Nervi P.L., 1950]



Immagine 3.53: foto interna del Padiglione C. Fonte: La voce Torino.

CAPITOLO 4

IL RILIEVO DEL LABORATORIO DI GEOMATICA DEL POLITECNICO DI TORINO

4.1 Inquadramento

L'impianto di Torino Esposizioni si va collocare all'interno dell'area verde del Parco del Valentino, all'estremità del quartiere di San Salvario. [Ceravolo, R., Lenticchia, E., Sapnò A.; 2019]

Il parco si sviluppa intorno alla prima metà del Seicento dopo la costruzione della residenza reale del Castello del Valentino (dal 1997 è inserito nella lista dell'UNESCO insieme a tutte le altre residenze sabaude piemontesi) che, ad oggi, è considerato il cuore del parco. Dapprima, il parco era caratterizzato da un solco naturale scavato da un corso d'acqua, il fiume Po, che si diramava lungo tutto il giardino con l'intento di portare acqua ai campi collocati all'interno del Parco del Valentino.

L'attuale conformazione di quest'ultimo come luogo di utilizzo pubblico, invece, si ha nel periodo del XIX secolo con l'abbattimento delle mura (1810) e con la proclamazione di Torino come capitale italiana. L'elezione di Torino come capitale fa sì che si necessiti di un adeguamento della città per elevarla al livello delle altre capitali europee. Infatti, nel 1854 sarà bandito il concorso di idee per l'ingrandimento del parco del Valentino che fu vinto da Jean Baptiste Kettmann

Nel 1860, Jean-Pierre Barillet-Dechamps completa i lavori apportando alcune modifiche e l'opera sarà completata tra il 1870-71 circa . [Carandini, F. 1925]

Inoltre, all'interno del parco è presente una riproduzione del Borgo e la Rocca Medievale realizzati, da artisti sotto coordinazione dell'architetto Alfredo d'Andrade, per l'Esposizione Nazionale di Prodotti per l'Industria del 1884. [Carandini, F. 1925]

Fu dopo l'Esposizione Internazionale del 1911 che il parco si assestò sulle sue dimensioni attuali.

L'estensione attuale del parco è di circa 42,10 ettari, partendo da Corso Vittorio Emanuele (a nord) fino a via Petrarca (a sud).

Verso l'asse del Po nel quartiere Nizza Millefonti, invece, troviamo l'ospedale Molinette, in cui sono localizzati le principali sedi sanitari per i cittadini.

Su questa conformazione geografica, ad oggi insistono diverse dinamiche di trasformazione come: il riuso del Palazzo del Lavoro (progettato per l'esposizione internazionale del lavoro dopo il concorso del 1959,il progetto di riuso è stato presentato nel 2012), la costruzione del nuovo grattacielo della Regione Piemonte (i lavori sono iniziati nel 2011 e sono ancora in corso), il futuro Parco della Salute (progetto bandito nel 2019) e un nuovo utilizzo per il Palazzo di Torino Esposizioni (per una nuova biblioteca civica). [Viotti A.; Zocco C.; 2018/2019]

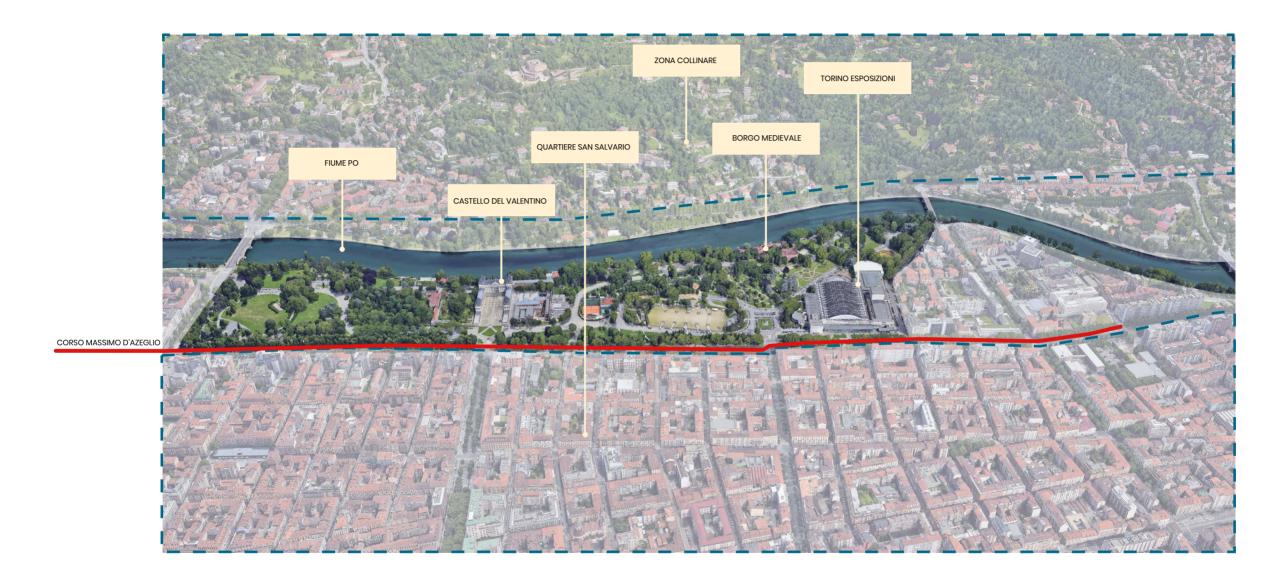


Immaaine 4.1: foto del Borgo Medievale situato all'interno del Parco del Valentino. Fonte: arte in Torino



mmagine 42: foto del Castello del Valentino (patrimonio dell'UNESCO) ed ex residenza reale. Fonte: Museo Torino

99



4.2 Obiettivo della ricerca

Il lavoro svolto si focalizza su un patrimonio straordinario ain cemento armato del XX secolo: il complesso di Torino Esposizioni con i suoi padiglioni B e C. Le attività svolte nel complesso di Torino Esposizioni sono legate al progetto "Keeping it Modern-Planning Grant 2019" incentivato dalla Gatty Foundation. L'obiettivo di questo progetto è quello di stanziare dei fondi per identificare i progetti che "hanno un forte potenziale per servire da modello per la conservazione di altri edifici del XX secolo". Infatti, dal 2014 ad oggi sono stati 77 i progetti sostenuti dall'iniziativa "Keeping it Modern", contribuendo allo sviluppo di piani di conservazione.

[Getty Foundation]

delle diverse diagnosi).

È attualmente impegnata nello sviluppo del Piano di Conservazione delle due sale progettato del complesso di Torino Esposizioni anche l'associazione PLN Project (progetto Pier Luigi Nervi, diretta da uno dei nipoti di Pier Luigi Nervi, Marco) incentrato sulla conservazione e il recupero delle opere di Nervi in Italia, e non solo. [Associazione PLN]

Considerata la grandezza e la complessità dell'edificio, per la fase di digitalizzazione 3D si è dovuti procedere con un approccio studiato ad hoc, in particolare per quanto riguarda l'elaborazione dei dati che mettono in relazione gli spazi interni con quelli esterni. Inoltre, per poter sviluppare un piano di conservazione è opportuno procedere in seguito ad una valutazione strutturale, specialmente per edifici dalla struttura così complessa. Perciò, realizzare un modello 3D preciso serve, oltre a sostenere attività di restauro e conservazione, a dare affidabilità metrica per le indagini e analisi strutturali e sismiche. [Ceravolo, R., Lenticchia, E., Sapnò A.; 2019]

Il lavoro di Torino Esposizioni viaggia nella direzione di creare un "gemello digitale" per supportare le attività per il futuro Piano di Conservazione del progetto di Nervi. Il modello 3D viene definito "gemello" per i suoi contenuti: geometrici e radiometrici, strutturali e materici per la gestione HBIM (in modo da gestire i diversi dati

L'obiettivo principale di tale ricerca è la correlazione dei dati raccolti, che possono essere suddivisi in 3 compiti:

- La definizione della configurazione globale dell'edificio e dell'involucro.
- L'individuazione, la suddivisione e la modellazione degli elementi implicati nell'analisi strutturale.
- L'organizzazione e la raccolta dei dati ricavati dai test diagnostici multidisciplinari.

4.3 il Rilievo del Igboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino

Per documentare gli spazi esterni (che comprendono anche il contesto urbano adiacente) è stato privilegiato l'utilizzo della fotogrammetria UAV; mentre per gli ambienti interni si è dovuti ricorrere all'utilizzo di diverse tecniche (in relazione alla complessità dell'area da rilevare). Per gli elementi strutturali delle sale principali, per gli spazi chiusi e le gallerie è stato utilizzato il LiDAR statico affiancato dal MMS (Mobile Mapping System) con un sistema basato su SLAM (sistema di mappatura mobile con tecnologie portatili). Mentre per le grandi altezze sono stati utilizzate fotocamere DSLR e micro-droni.

Dopodiché è stato stabilito un sistema di riferimento comune per via topografica che rappresenta il punto di partenza delle procedure di co-registrazione e d'integrazione dei dati derivanti da differenti sensori e tecniche. La parte più complicata del rilievo, come già accennato, è stata quella di mettere in relazione i dati interni con quelli esterni a causa dei requisiti metrici degli elementi in ferrocemento. Le acquisizioni svolte sono state tutte georeferenziate a partire dalla rete topografica utilizzando il sistema di riferimento mondiale: WGS84/UTM32N; che garantisce una precisione millimetrica e il controllo metrico per la propagazione degli errori. In totale i vertici identificati, per formare

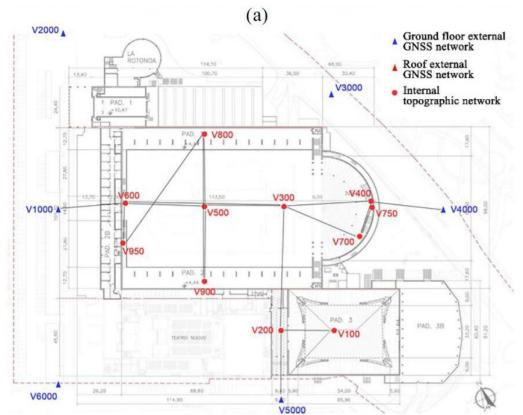


Immagine 4.4: immagine con rappresentazione dello schema topografico con annessi vertici del rilievo effettuato a Torino Esposizioni.

Fonte: Sammartano, G. ; et al; 2021.

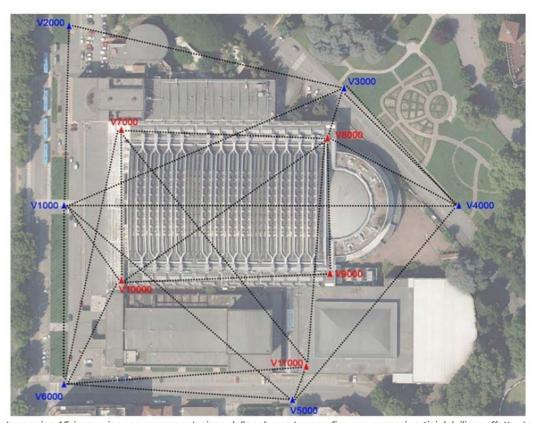


Immagine 4.5: immagine con rappresentazione dello schema topografico con annessi vertici del rilievo effettuato a Torino Esposizioni.

Fonte: Sammartano, G. ; et al; 2021.



MONOGRAFIA VERTICE

LAVORO: Torino Esposizioni - GETTY Foundation "Keeping It Modern" DATA:

NOME VERTICE:

LOCALIZZAZIONE: interno

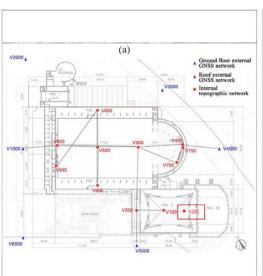
250

COORDINATE:

X= 396260.724 **Y**= 4989092.548

Z_{elli}= 279.708

 $Z_{geo} = 230.924$



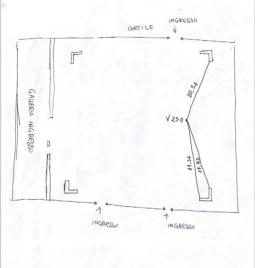






Immagine 4.6: esempio di monografia di uno dei vertici (V250) interni della rete topografica di Torino Esposizioni.



MONOGRAFIA VERTICE

LAVORO: Torino Esposizioni - GETTY Foundation "Keeping It Modern" DATA:

NOME VERTICE:

LOCALIZZAZIONE: esterno

11000

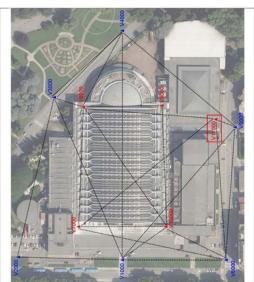
COORDINATE:

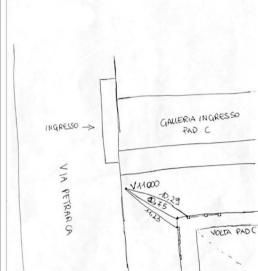
X= 396206.2245

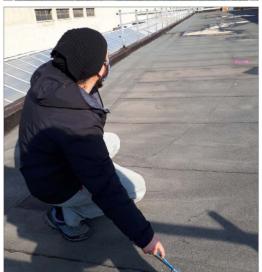
Y= 4989096.4288

Z_{elli}= 287.1250

 $Z_{geo} = 238.333$







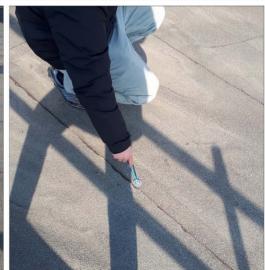


Immagine 4.7v: esempio di monografia di uno dei vertici (V11000) interni della rete topografica di Torino Esposizioni.

la rete topografica, sono 11 esterni (6 a livello strada e 5 sul tetto) e 11 interni. (immagine 4.4 e 4.5)

[Sammartano, G.; 2021]

Dopodiché sono state elaborate delle schede riassuntive dette monografie dove vengono riportate tutte le coordinate dei vertici in modo tale da non smarrirne l'esatta posizione nel tempo. (immagine 4.6 e 4.7)

La prima parte del lavoro è stata quella di pianificare l'acquisizione fotogrammetrica per poter definire le misure dell'involucro del Complesso di Torino Esposizioni. Per l'acquisizione delle immagini aeree è stato utilizzato un DJ Phantom 4 (drone) equipaggiato con una fotocamera ad alta risoluzione. Per il bundle block adjustment (BBA) è stato utilizzato il metodo dei marker; i vari punti sono stati posizionati in modo omogeneo per poter effettuare la georeferenziazione ed il controllo dell'accuratezza dei dati durante l'elaborazione fotgrammetrica. Per poter aumentare la precisione dei BBA, oltre ai marker, sono stati misurati anche una serie di punti naturali.

[Sammartano, G.; 2021]

Per la fotogrammetria aerea sono stati predisposti diversi voli per poter acquisire il maggior numero di immagini per le superfici di

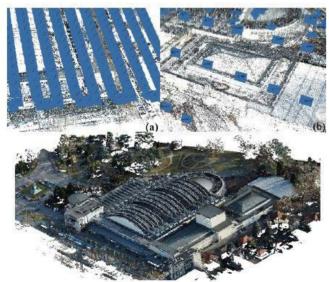


Immagine 4.8: Esempio delle acquisizioni di immagini nadirali; oblique e nuvola di punti. Fonte: Sammartano, G. ; et al; 2021.

copertura, sono state acquisite sia immagini nadirali che oblique (45°) (immagine 4.8). I voli sono stati effettuati a 60 m di altezza con una GSD(Ground Sample Distance) media di 1,6 cm. Le immagini raccolte durante i voli sono quasi 1900 (850 immagini nadirali e 1072 immagini oblique). Per ottenere un modello di novala di punti densa le immagini sono state elaborate seguendo il metodo Structure from Motion (SfM).[Sammartano, G.; 2021]

Il secondo obiettivo si concentra sugli elementi strutturali, identificandoli e modellandoli con la strategia di modellazione numerica FEM (utilizzata per le analisi strutturali). La modellazione numerica si basa non solo sul modello ricavato dai disegni originali ma anche sullo stato di fatto.

[Lenticchia et al.; 2017]

Per l'analisi strutturale il padiglione C è stato suddiviso in elementi monodimensionali, bidimensionali e tridimensionali (immagine 4.9):

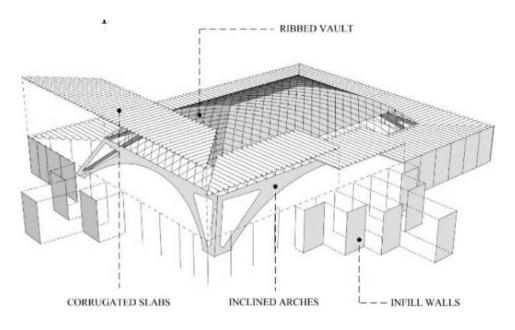


Immagine 4.9: Schema degli elementi strutturali. Fonte: Sammartano, G.; et al; 2021.

- Elementi monodimensionali: le costole e la trave ad anello della volta.
- Elementi bidimensionali: le lastre di riempimento della volta e gli elementi ondulati.
- Elementi tridimensionali: gli arconi inclinati essendo elementi di origine monolitica (e quindi una dimensione non è trascurabile rispetto ad un'altra)

Per questa ragione il rilevo è stato eseguito utilizzando due sistemi di scansione laser a spostamento di fase (che risultano essere più precisi e veloci) della Faro: Faro Focus3D X 330 e Faro3D S120. Le scansioni effettuate sono state 44, questo perché il padiglione ha dimensioni grandi ma anche perché la volta presenta un elevato numero di elementi rientranti (nervature). Questo elevato numero di scansioni è servito per evitare occlusioni e mancanza di dati garantendo omogeneità della distribuzione dei punti. Per registrare le nuvole di punti del laser scanner sono stati eseguiti due step:

- Una registrazione nuvola-nuvola tramite l'algoritmo ICP (Iterative Closet Point) che sovrappone le diverse scansioni sfruttando le geometrie della stanza.
- Dopodiché la nuvola ottenuta è stata rototraslata rigidamente nel sistema di riferimento corretto utilizzando 40 punti (misurati con la ST).

[Sammartano, G.; 2021]

Il terzo ed ultimo obiettivo rappresenta la fase di documentazione dei dati delle diverse fasi del rilievo e di organizzare le informazioni. Questo implica un impegno continuo, costante e accurato nel monitorare e co-registrare i dati.

Gli archi sono stati considerati, insieme ai loro basamenti, gli elementi strutturali più importanti del salone. Durante la fase di studio e documentazione è affiorato che per la costruzione di questi ultimi Nervi ha utilizzato tre diverse tipologie di calcestruzzo durante la fase di getto (la porzione di arco e la parte superiore in calcestruzzo "tipo 680", mentre il puntone in calcestruzzo "tipo 500"). Infatti, a seguito delle prove meccaniche (eseguite dal Team Strutturale de Politecnico di Torino) che sono state ideate di conseguenza per verificare la congruenza del calcestruzzo con

110

la struttura, è emerso che nei punti in cui i sono presenti le diverse fasi di colata sono merse delle fessurazioni sugli archi. La maggior parte delle crepe sono sicuramente collegate alle diverse fasi di colatura, ma non solo, perché altre possono essere state scaturite da agenti coazione fisici (come corrosione e/o risalita capillare di acqua e umidità).

Il team di ingegneria strutturale per rispondere a questo bisogno ha condotto delle indagini diagnostiche e durante questa fase è stata molto importante l'integrazione interdisciplinare, del rilievo fotogrammetrico molto ravvicinato dei basamenti dei quattro pilastri del salone C. Questo tipo di approccio è servito ad individuare dei punti di indagine diagnostica sul modello 3D multitemporale.(immagini 4.10 e 4.11)

È stata fondamentale anche la rapidità di acquisizione, per ogni pilastro il rilievo si è concluso in circa 30 minuti e ottenendo un prodotto metrico ad alta risoluzione geometrica. Per il rilievo dei pilastri è stata usata una fotocamera digitale reflex single lens

111







Da sinistra Immagine 4.10 e 4.11: modello fotogrammetrico del basamento; Modello multitemporale effettuto in diversi momenti.

Fonte: Sammartano, G. ; et al; 2021.

CAPITOLO 5

COMPARAZIONE TRA IL PROGETTO E LA REALIZZAZIONE DEL "PADIGLIONE C" DI TORINO ESPOSIZIONI

113

5.0

In questo capitolo sarà affrontato il tema della digitalizzazione e della conoscenza strutturale del Padiglione C di Torino Esposizioni applicato ai disegni originali di Pier Luigi Nervi.

In particolare, questo processo di digitalizzazione, si suddividerà in diverse fasi:

- Ricerca ed analisi in cui si cercherà di capire l'importanza che Nervi attribuisce al disegno: partendo da una ricerca bibliografica per poi arrivare all'analisi dei disegni originali del Padiglione C di Torino Esposizioni.
- Analisi del sistema strutturale del Padiglione C, per la facile comprensione dei diversi elementi strutturali di cui esso è composto.
- Digitalizzazione dei disegni originali generando una modellazione 2D/3D.
- Infine la comparazione dei disegni originali e del modello 3D (ricavato dai disegni originali) con quelli estrapolati dalla nuvola di punti del rilievo del laboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino.

5.1 Nervi e il disegno

L'eredità dei disegni di Nervi è molto vasta, tra schizzi, progetti preliminari, definitivi e tantissimi disegni di rappresentazioni prospettiche. Nel corso degli anni è stato esaminato il tipo di grafica nel disegno di Nervi, cercando di individuarne le variazioni nei progetti lungo il corso della sua carriera. Da questa analisi si è cercato di determinare la "tecnica esecutiva" e le "caratteristiche stilistiche" utilizzate da Nervi e individuarne i cambiamenti nel corso del tempo; cambiamenti che si sono sviluppati grazie all'esperienza acquisita nei suoi anni da progettista-ingegnere.

In generale i suoi disegni sono sempre accompagnati da annotazioni di estrema precisione come quote e appunti. Spesso gli appunti che troviamo sui disegni sono spiegazioni del progetto dal punto di vista strutturale o anche risoluzioni dei problemi costruttivi. [Vernizzi, C. 2011]

Queste informazioni si sono rivelate fondamentali per la fase di digitalizzazione dei disegni originali, per cui questo lavoro di tesi non sarebbe stato del tutto possibile, considerando anche la complessità dell'edificio;

Poretti *[lori, T., & Poretti, S.; 2008]* ha elaborato una suddivisione in base ad un'analisi effettuata sui disegni dell'ingegnere Nervi relativi a trenta diversi progetti nel corso del tempo. In "Pier Luigi Nervi, L'ambasciata italiana" con il suo capitolo "Nervi che visse tre volte" suddivide i suoi disegni in tre diversi periodi che lui definisce come "vite". Come già detto prima questo è dovuto dalle diverse esperienze nell'ambito progettuale anche se "sempre profondamente radicate nel contesto culturale";

Questi tre periodi possono essere suddivisi in:

- Gli anni che vanno dalla laurea (1913) di Nervi all'inizio della Seconda guerra mondiale. In quest'arco temporale si dedica allo studio del cemento armato nell'impresa di Attilio Muggia e progetta lo Stadio di Berta a Firenze.
- Il secondo periodo, che parte come sequenza del primo fino alla metà degli anni Sessanta. È proprio in questo periodo che Nervi raggiunge l'apice della sua carriera con una "serie di opere capolavoro" che si vanno ad inserire nelle opere dell'ingegneria italiana del secolo; inoltre, in questo lasso di tempo diventa socio della Nervi & Bartoli e si dedica maggiormente al campo strutturale (come calcolatore e progettista).
- L'ultimo periodo viene associato a quello in cui Nervi diventa titolare di uno studio tutto suo, in cui vediamo la progettazione dell'ingegnere espandersi al di fuori del territorio italiano. Troviamo grandi realizzazioni in Canada, Stati Uniti e Australia.

Durantequestaricerca Poretti, però, hatenuto conto esclusivamente degli aspetti grafici e non di quelli progettuali come per esempio:

- Supporto cartaceo
- Dimensioni del foglio
- · Dimensioni della cornice
- La scala di rappresentazione
- La tecnica

- La presenza o meno di annotazioni
- La presenza del cartiglio (se i progetti fossero fatti in collaborazione o meno)
- La data
- L'autore

[lori, T., & Poretti, S.; 2008]

Inoltre, è possibile suddividere per tipologia i disegni di Nervi in due ulteriori categorie:

- I disegni esecutivi: che troveremo nel corso di tutta la carriera di Nervi, in diverse scale di riduzione (fino ad arrivale alla scala 1:1) e non solo per i progetti strutturali ma anche per l'organizzazione del cantiere e delle macchine da utilizzare.
- I disegni prospettici: una categoria che forse non ci si aspetterebbe da un progettista di strutture; questi disegni vengono utilizzati sia per riprodurre intere strutture sia per il disegno dei dettagli costruttivi.

Al di là del tipo di rappresentazione, o del periodo della vita di Nervi in cui viene collata, Chiara Vernizzi afferma che: "attraverso l'analisi di questi elaborati è possibile cogliere lo spirito di Nervi, delle sue idee, del suo modus operandi, del suo stile".

[Vernizzi, C.; 2011]

Per quanto riguarda le elaborazioni grafiche per i Padiglioni B e C del complesso di Torino Esposizioni, sono molte le tavole di disegni esecutivi. Le tecniche di realizzazione di queste ultime sono diverse come: matita e inchiostro di china, su carta sia da spolvero che da lucido. Parecchi disegni sono firmati dallo stesso Nervi e le scale di riduzione si alternano prevalentemente tra 1:5, 1:20 e 1:10 per i disegni dei dettagli costruttivi. Inoltre, per il disegno dei dettagli costruttivi, utilizza una doppia proiezione ortogonale (spesso sezioni verticali e orizzontali) con annesse descrizioni, quote e campiture. Oltre ai disegni tecnici, anche qui, troviamo una serie di schizzi a matita e assonometrie.

[Vernizzi, C.; 2011]

Tutti i documenti redatti da Nervi, anche quelli relativi al Palazzo delle Esposizioni di Torino, sono stati donati dai suoi figli al CSAC (Centro Studi e Archivio della comunicazione dell'Università di

Parma) nel 1986. Qui sono stati raccolti tutti gli appunti, i disegni dei progetti, che sono 37099 divisi in 869 progetti conservati in delle apposite cartelle. L'arco temporale che racchiude questi elaborati va dal 1920, quando Nervi lavora con l'ingegnere Nebbiosi, fino alla fine del 1970.

[Pagliari, P. 2011]

5.2 La fase di analisi e ricerca

Come già accennato nel paragrafo precedente la prima parte del lavoro si è svolta esaminando i disegni originali prodotti da Pier Luigi Nervi per il progetto del padiglione C. I disegni utilizzati per questa prima fase sono prevalentemente di proprietà dell'archivio del CSAC (Centro Studi e Archivio della Comunicazione dell'Università di Parma). Il lavoro di studio dei disegni si è svolto in parallelo con una ricerca storica. È stato inevitabile far viaggiare insieme queste due tipologie di ricerche per poter meglio capire ed analizzare le scelte progettuali trascritte nelle tavole di progetto di Nervi. Successivamente è stata fatta una selezione delle tavole al fine di ridisegnare e modellare alcuni degli elementi costruttivi del Padiglione in questione.

Nell'analisi formale del padiglione, il primo aspetto da considerare è quello strutturale che, come spesso accade negli edifici di Nervi, per il complesso di Torino Esposizioni coincide con la forma. Nella fase di ridisegno si è seguita la gerarchia strutturale, per cui il primo step è stato quello di analizzare e studiare le tavole di progetto delle fondazioni.

117

5.3 La digitalizzazione dei disegni di progetto di P. L. Nervi: 2D e 3D

Prima di passare alla fase di digitalizzazione dei disegni è opportuno fornire un quadro del sistema strutturale (immagine 5.1) del Padiglione per poter comprendere al meglio tutti gli elementi di cui esso è composto; questo faciliterà la lettura dei paragrafi che seguiranno.

Possiamo suddividere il Padiglione C in diversi elementi strutturali:

- La volta caratterizzata da nervature che sono suddivise alla base da elementi senza chiusura sommitale e al di sopra con chiusura sommitale (immagine 5.4).
- Al di sotto della volta abbiamo i quattro arconi a doppia curvatura (dovuta dalla risultante della spinta della volta e dal peso del sistema di copertura perimetrale), che a loro volta possono essere suddivisi in tre parti, dovute da tre diverse fasi di getto del calcestruzzo, abbiamo quindi i pilastri ad angolo, i puntoni e telaio e travi d'imposta. (immagini 5.2; 5.3 e 5.5)Il solaio perimetrale (per dare rigidità orizzontale al sistema di copertura) formato da lastre ondulate.
- Le fondazioni che sono formate dai quattro plinti che sorreggono i quattro arconi e i plinti dei pilastri perimetrali. [Lenticchia, E.: et al 2017]

Gli elementi strutturali che si andranno ad approfondire nei prossimi paragrafi sono: le fondazioni, gli arconi e la volta.

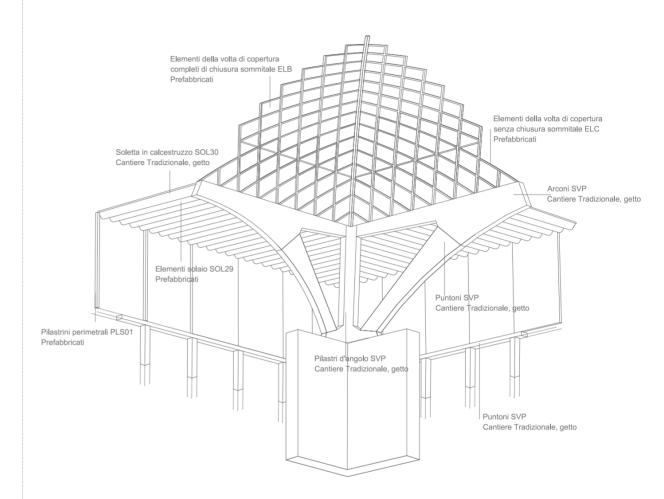
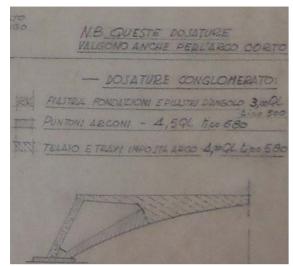


Immagine 5.1: immagine con rappresentazione dello schema strutturale del Padiglione C. Fonto: Lenticchia. E.: et al 2019



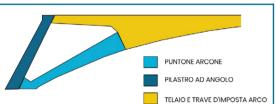


Immagine 5.2 e 5.3: zoom di una tavola originale di progetto con rappresentazione della diviosione dell'elemento arcone in tre parti e rielaborazione dello schema.
Fonte: CSAC.



Immagine 5.3: foto della volta degli elementi con e senza chiusura. Fonte: foto del candidato.



Immagine 5.5: foto rappresentante l'arcone verso sud-est. Fonte: foto del candidato.

5.3.1 Le fondazioni

La fase s di ridisegno è quindi iniziata dalla pianta delle fondazioni seguendo le tracce dell'immagine 5.6 (nelle pagine seguenti) che rappresenta la tavola di progetto di Nervi.

Come si può notare dalla tavola, le fondazioni sono caratterizzate da quattro grandi plinti posizionati rispettivamente ai quattro angoli della pianta del padiglione. Questi sono in cemento armato e sostengono i quattro arconi del padiglione. Invece, per quanto riguarda i muri perimetrali, questi sono intervallati da pilastri con sezione di40x30 cm e 40x40 cm (immagine 5.7, pagine seguenti) per i pilastri angolari (che vanno ad appoggiarsi sui plinti sopracitati). I disegni di Nervi sono un'ulteriore testimonianza della sua precisione, infatti, come visibile nell'immagine (vedi quote dello zoom della tavola dell'immagine 5.6, nelle pagine seguenti)., le quote spesso arrivano ad una precisione del mezzo millimetro, nonostante le grandi dimensioni degli elementi.

Ed è proprio grazie a questa sua precisione nel quotare tutto nei minimi dettagli che è stato possibile ridisegnare ogni elemento con il minimo errore.

Molto utili sono state le diverse tavole di rappresentazione, da quelle della pianta generale a quelle di dettaglio degli elementi costruttivi principali (immagine 5.8, nelle pagine seguenti).

Dai disegni si riesce a risalire ad alcune delle varianti apportate dalla prima fase di progetto alla fase di cantiere. Ad esempio, nell'immagine (immagini 5.6 e 5.9, nelle pagine seguenti) si nota che la simmetria del padiglione viene riportata anche nelle fondazioni con i quattro plinti in cemento armato. Successivamente, in corrispondenza del salone B, a causa dell'interferenza del sistema fognario uno dei plinti ad angolo è stato modificato (immagine 5.10).

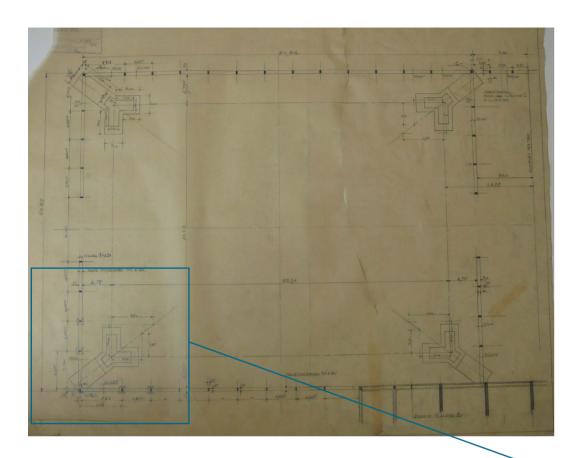


Immagine N: zoom della tavola della pianta generale delle fondazioni Fonte: CSAC

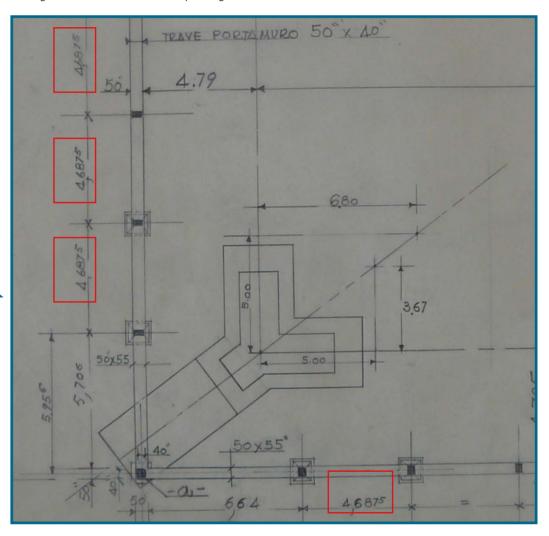


Immagine 5.6: tavola della pianta generale delle fondazioni. Fonte: CSAC

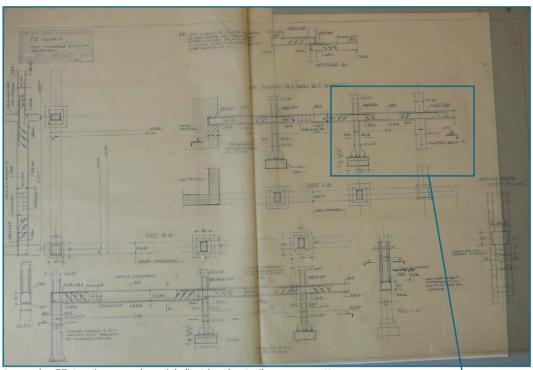
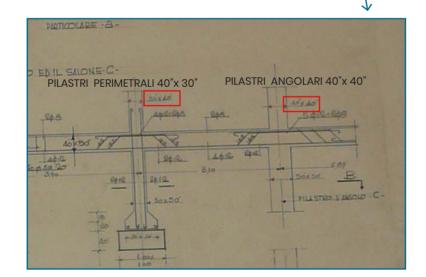


Immagine 5.7: tavola con sezione dei pilastri perimetrali con zoom sotto. Fonte: CSAC



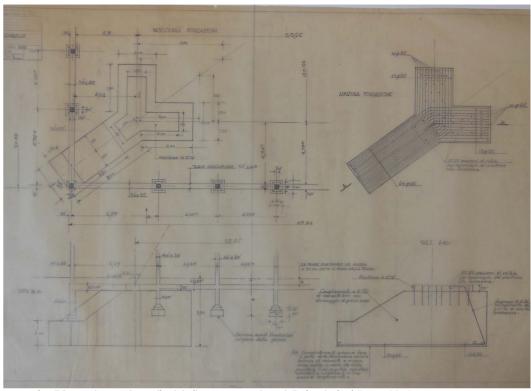


Immagine 5.8: tavola con dettaglio del pilastrone angolare delle fondazioni. Fonte: CSAC

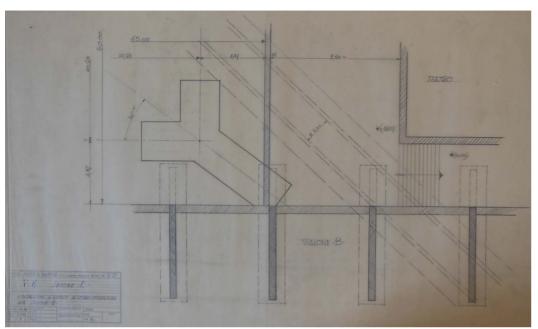


Immagine 5.9: tavola con dettaglio del pilastrone angolare delle fondazioni in corrispondenza del salone B (disegno annullato). Fonte: CSAC

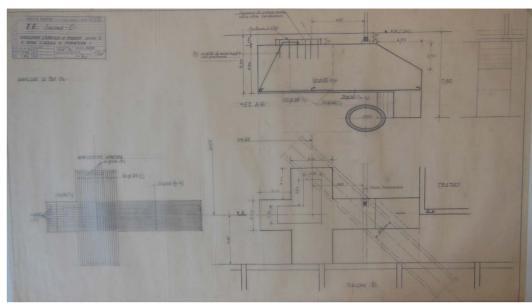
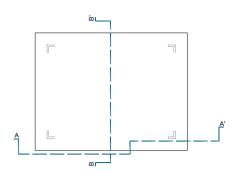


Immagine 5.10: tavola con dettaglio del pilastrone angolare delle fondazioni in corrispondenza del salone B (disegno definitivo). Fonte: CSAC



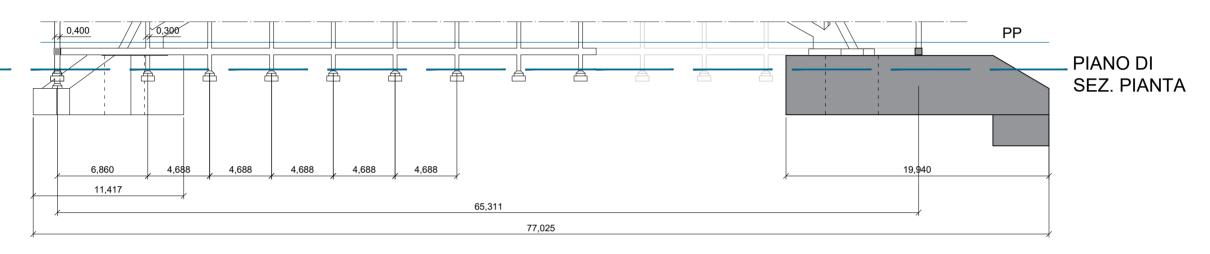
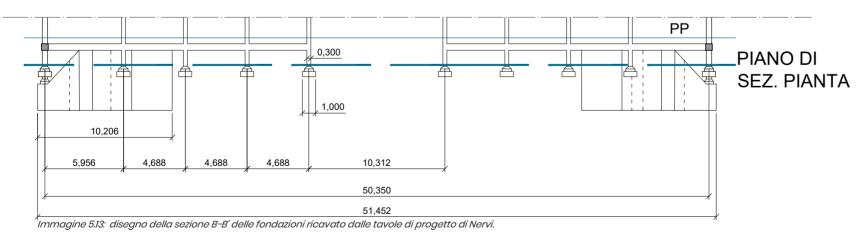


Immagine 5.12: disegno della sezione A-A' delle fondazioni ricavato dalle tavole di progetto di Nervi.



5.3.1.1 Il rilievo termico

Il telerilevamento termico è "l'acquisizione, elaborazione e l'interpretazione dei dati acquisiti nella regione dell'infrarosso dello spettro elettromagnetico". Si basa sulla connessione tra radiazione infrarossa e temperatura secondo il principio della radiazione di corpo nero che emette radiazioni dipendenti solo dalla sua temperatura. Quindi ad un'immagine termografica corrisponde una mappa raster che riproduce le variazioni dell'intensità della radiazione.

Spesso il telerilevamento termico viene utilizzato per rilevare alterazioni o danni di edifici storici e beni Culturali con il metodo del telerilevamento a distanza ravvicinata. Quest'ultimo si concentra principalmente sulle informazioni tematiche anziché sull'accuratezza geometrica tramite l'applicazione della diagnostica non distruttiva di materiali e superfici.

Infatti, di recente, l'uso dell'IRT (termografia ad infrarossi) insieme alla fotogrammetria digitale e la ser scanner terrestre ha supportato l'evoluzione delle tecniche di rilievo a distanza ravvicinata, abbinando i dati di portata, di immagine e quelli termici per la documentazione.

[Patrucco, G.; et al. 2020]

Da qualche anno anche le piattaforme UAV sono state dotate di sensori termici riuscendo ad aumentare il livello di dettaglio.

L'interpretazione tematica dei dati termici si ottiene tramite singole immagini che possono essere unite originando ortoimmagini per analizzare superfici o oggetti.

Nel caso del Padiglione C è stato effettuato un rilievo fotogrammetrico a distanza ravvicinata e parallelamente sono state acquisite immagini termiche per poter rilevare i pilastri dei muri perimetrali.

Dopodichè si è passati alla selezione delle immagini termiche per poterle poi elaborare; con lo scopo di individuare la posizione dei pilastri perimetrali del salone.

Tuttavia, delle immagini ricavate dal rilievo termico solo in quelle in corrispondenza delle pareti sud-ovest e sud-est erano visibili i pilastri (immagini 5.14 e 5.15)

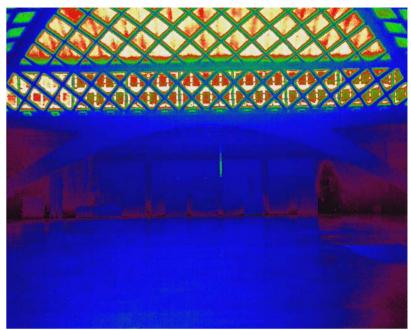


Immagine 5.14: esempio di immagine termica in cui sono visibili i pilastri in prospetto. Nella foto è raffigurato il prospetto sud-est del Padiglione Fonte: Laboratorio di Geomatica

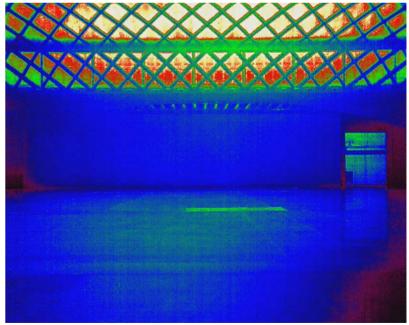


Immagine 5.15: esempio di immagine termica in cui non sono visibili i pilastri in prospetto. Nella foto è raffigurato il prospetto nord-ovest del Padiglione Fonte: Laboratorio di Geomatica

Una volta selezionate le immagini, tramite un software per calibrare i colori delle immagini si è cercato di modificare le foto utilizzando lo stesso rapporto tra colori e temperature, così da poter realizzare un photomerge e dunque rappresentare la sezione con una sola ortoimmagine.

Per l'elaborazione delle immagini termiche è stato utilizzato il software Cyclon, in cui è stata importata la Nuvola di punti del Padiglione C (elaborata dal laboratorio di Geomatica) e ricavando le rispettive sezioni sud-est e sud-ovest sono poi state inserite le immagini e posizionate sulla nuvola tramite collimazione dei punti omologhi tra le immagini e la nuvola. Una volta selezionati i punti che consentono l'overlapping, gli algoritmi di matching di immagine consentono di calcolare ortofoto, ovviamente intesa in senso non rigoroso e non propriamente fotogrammetrico, da qui si possono generare delle ortoimmagini. (immagini 5.16 e 5.17)

Essendo le immagini termiche a disposizione insufficienti non si è riusciti a ricavare l'intero prospetto di entrambe le due pareti.

Le ortoimmagini ricavate, sono poi state orientate in base alle coordinate dei disegni ricavati dalla nuvola di punti per poterle poi sovrapporre senza errori. Essendo le due ortoimmagini incomplete non sono stati identificati tutti i pilastri ma solo una parte di essi. (immagini 5.18 e 5.19, nelle pagine seguenti)

Infine si è passati a comparare i dati ricavati con i dati dei disegni originali di Nervi, e come possiamo vedere dalle immagini, la posizione dei pilastri è sfalsata rispetto a quella di progetto:

- La sezione sud-ovest (C-C'): i pilastri non combaciano perfettamente risultando sfasati; inoltre nelle tavole di progetto non sono presenti le due aperture, questo probabilmente perché le tavole in questione non erano la versione definitiva del progetto.
- La sezione sud-est (B-B'): nella comparazione di quest'ultima solo uno dei pilastri è notevolmente sfasato rispetto agli altri che sembrano avere lo stesso passo di quelli progettati.

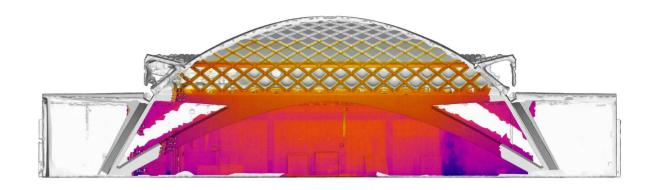


Immagine 5.16: ortoimmagine ricavata dal photomerge delle immagini termiche posizionate sulla nuvola di punti. Sezione sud-est

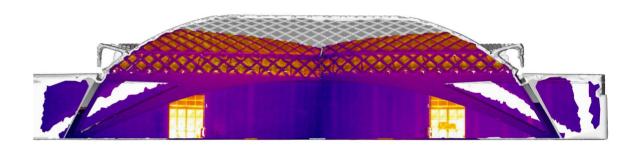


Immagine 5.17: ortoimmagine ricavata dal photomerge delle immagini termiche posizionate sulla nuvola di punti. Sezione sud-ovest.

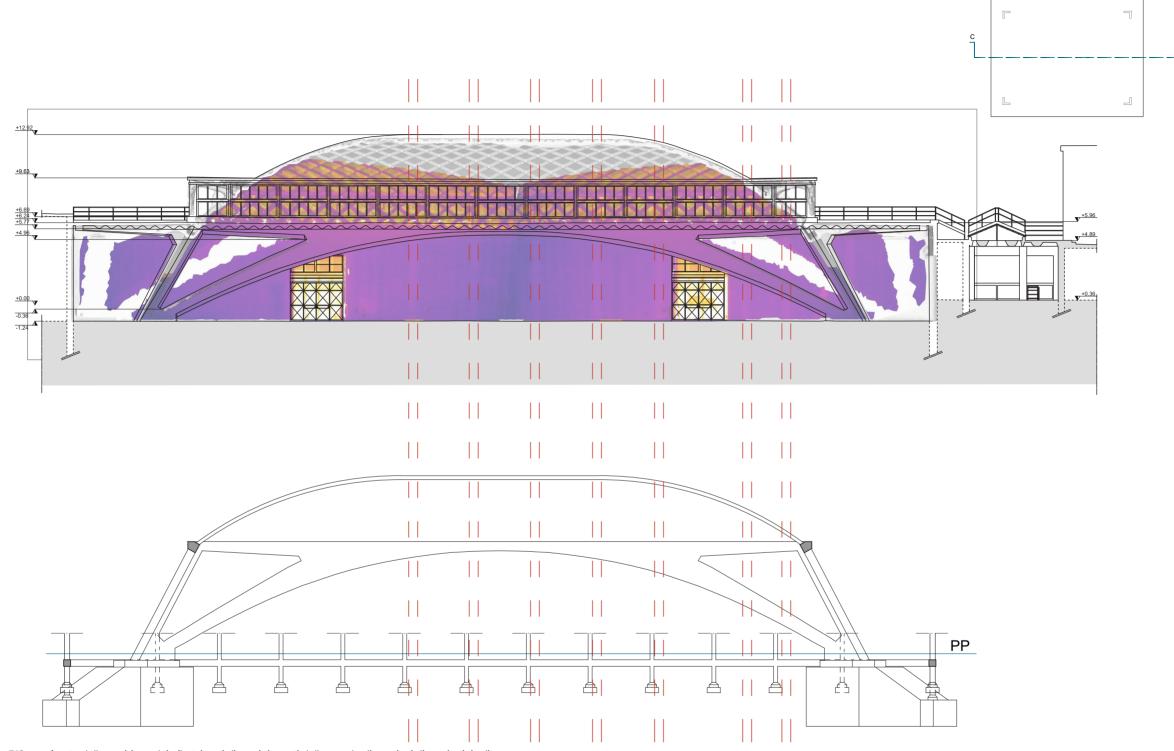
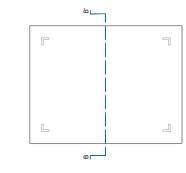


Immagine 5.18: confronto della posizione dei pilastri tra i disegni ricavati dalla nuvola di punti e i disegni originali. Sezione Sezione sud-ovest (C-C') Fonte nuvola di punti: Laboratorio di Geomatica



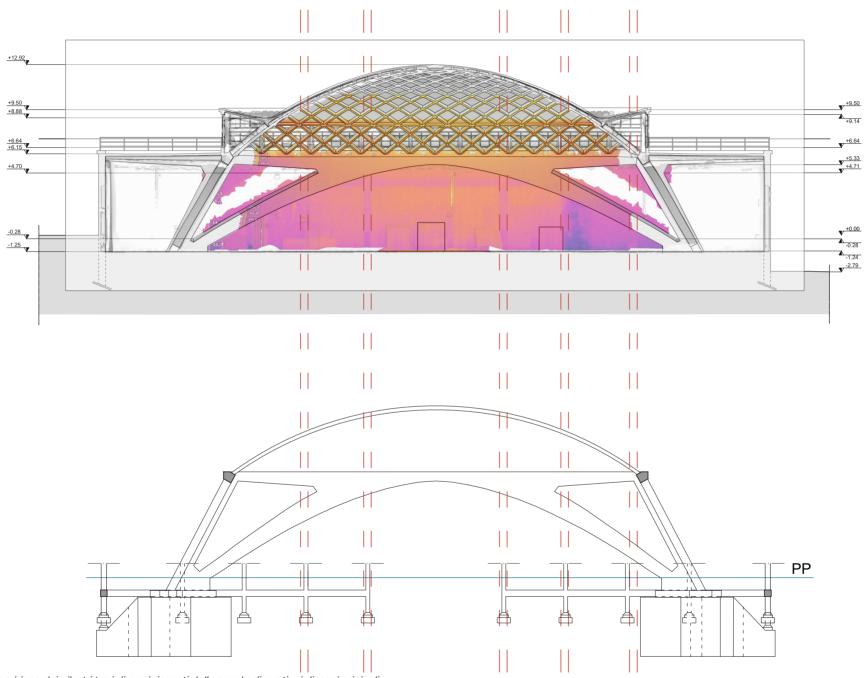


Immagine 5.19: confronto della posizione dei pilastri tra i disegni ricavati dalla nuvola di punti e i disegni originali. Sezione Sezione sud-est (B-B') Fonte nuvola di punti: Laboratorio di Geomatica

5.3.2 Gli arconi e la volta

Dopo aver terminato il disegno delle fondazioni, il passaggio successivo è stato quello di ridisegnare anche i **quattro arconi** che scaricano il loro peso sui plinti di fondazione esaminati nel paragrafo precedente. Per convenienza possiamo distinguere gli "arconi grandi" e gli "arconi piccoli" considerando che si sviluppano sulla pia (dimensioni di progetto)nta rettangolare del padiglione C di dimensioni 50,85 m x 65,85m. Gli arconi rappresentano, insieme ai pilastri inclinati ad angolo, il sistema di supporto della volta del padiglione, e seguono l'inclinazione dei carichi che trasferiscono dalla volta alle fondazioni. La copertura piana che circonda la volta funge da ulteriore contenimento della spinta orizzontale della volta stessa.

Le immagini 5.20 e 5.21 raffigurano il raccordo tra i due arconi e il pilastro inclinato ad angolo.

Molto utile per il ridisegno della sezione degli arconi sono stati i disegni originali dei profili di quest'ultimi (immagini 5.23 e 5.24); per definire l'andamento dell'arco, Nervi ha disegnato le quote delle altezze dell'intradosso degli elementi ad intervalli di 1,25m, quindi, una curva tracciata per punti. Per ognuno dei due arconi vi è una tavola nominata "Profilo dell'arco (lato lungo)" e "Profilo dell'arco (lato corto)" per via delle due diverse dimensioni.

Da questi disegni è stato possibile quindi ricavare il disegno dell'intradosso degli arconi grandi e piccoli e come si può vedere dall'immagine 5.34 (a pag. 149) solo l'intradosso dell'arcone grande è formato da un arco di circonferenza.

Dopodiché con l'utilizzo di altre tavole, contenenti i dettagli degli arconi (immagini 5.25; 5.27; 5.28; 5.29; 5.30), sono state ricavate le restanti misure per completare la costruzione di questi ultimi in 2D (immagine 5.26). Infine, l'ultimo elemento di analisi di studio è stata **la volta** che sovrasta gli arconi.

La parte bassa della volta garantisce l'illuminazione naturale all'interno del padiglione, "svuotando" gli spazi tra le nervature e posizionando dei lucernari staccati dalla volta; nella restante parte la volta è opaca. (immagine 5.22)

Le misure in pianta della volta sono di 30.80 x 45.85 m (immagine

5.33). Anche per quest'ultima è stato seguito lo stesso procedimento utilizzato per le fondazioni e per gli arconi; disegnando prima la pianta e poi le sezioni (sia per il lato lungo che per il lato corto).





Immagine da sinistra 5.20 e 5.21: foto della giuntura degli arconi in cui si può vedere il solaio perimetrale ondulato, foto della giuntura all'angolo dei due arconi. Fonte: foto del candidato



Immagine 5.22: Foto del Padiglione C. Fonte: foto del candidato.

Immagine 5.23: tavola con disegno del profilo dell'arcone del lato corto. Fonte: CSAC

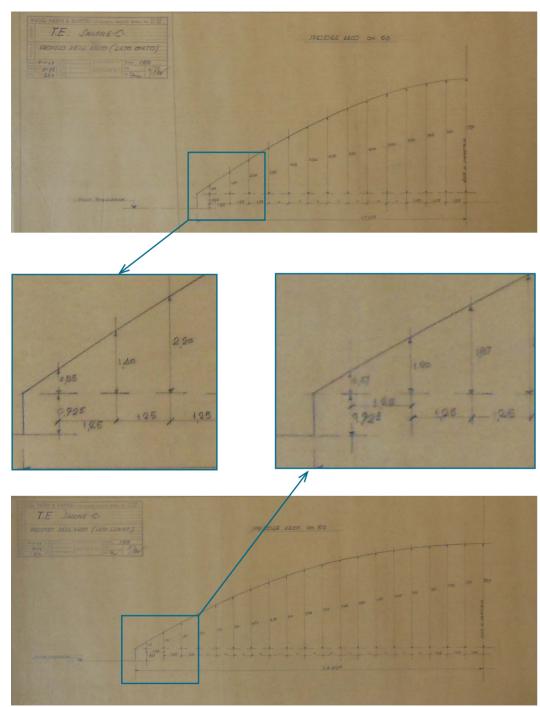


Immagine 5.24: tavola con disegno del profilo dell'arcone del lato lungo. Fonte: CSAC

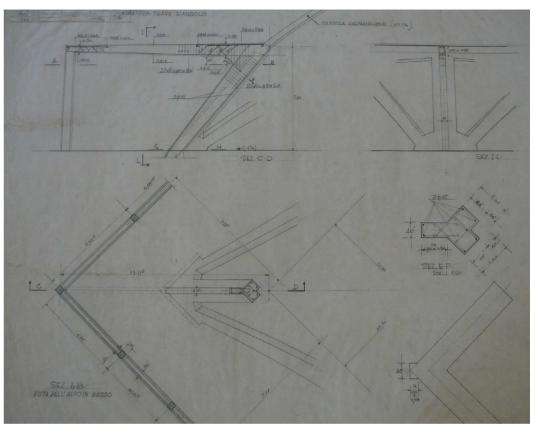
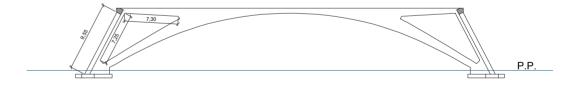


Immagine 5.25: tavola con disegno del dettaglio della trave ad angolo e pilastro di giuntura tra i due arconi. Fonte: CSAC



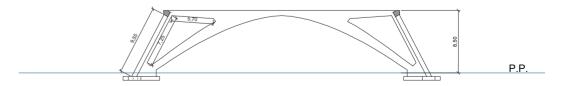


Immagine 5.26: disegni delle sezione degli arconi ricavati dalle tavole dei progetti originali di Nervi.

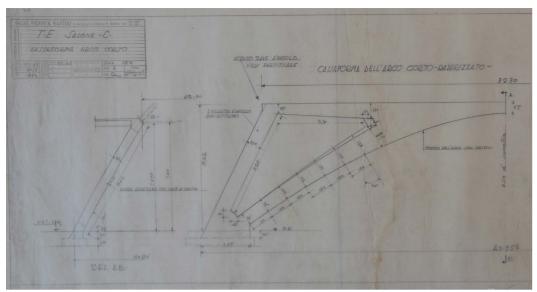


Immagine 5.27: tavola con disegno della cassaforma dell'arcone del lato corto. Fonte: CSAC

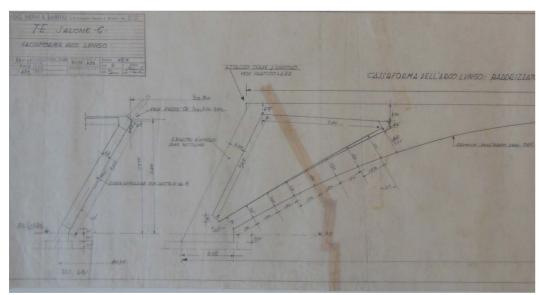


Immagine 5.28: tavola con disegno della cassaforma dell'arcone del lato lungo. Fonte: CSAC

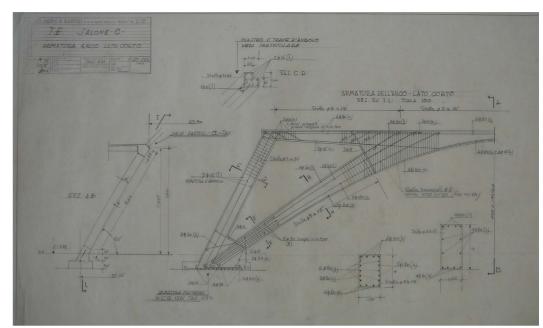


Immagine 5.29: tavola con disegno dell'armatura dell'arcone del lato corto. Fonte: CSAC

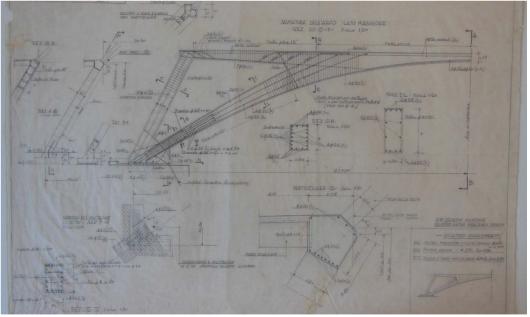


Immagine 5.30.30: tavola con disegno dell'armatura dell'arcone del lato lungo. Fonte: CSAC

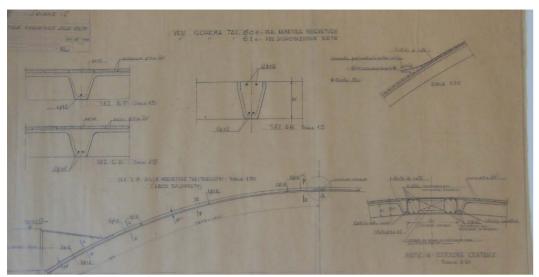


Immagine 5.31: tavola con sezione della volta. Fonte: CSAC

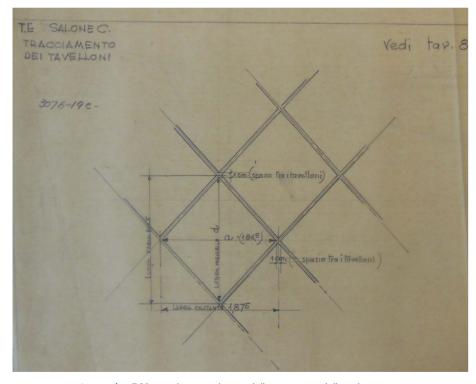


Immagine 5.32: tavola con schema delle nervature della volta. Fonte: CSAC

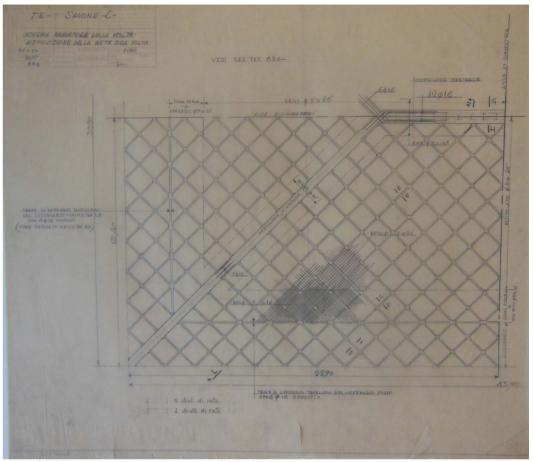


Immagine 5.33: tavola con schema generale della volta. Fonte: CSAC

I disegni utilizzati per il ridisegno della volta sono raffigurati dalle immagini 5.31, 5.32 e 5.33 (nelle pagine precedenti).

Le sezioni della volta sono state ricavate tramite l'utilizzo del software Autocad con il comando arco per tre punti visto che non si è riusciti a trovare informazioni relative al raggio di curvatura secondo il progetto originale. Per questo è stato molto importante capire quale fosse la geometria di partenza della volta, visto che, come abbiamo già trattato nel sotto capitolo "Le strutture a guscio", era usuale per Nervi progettare strutture simmetriche e coperture con delle geometrie di partenza formate principalmente da archi di circonferenza.

Quindi, un'ulteriore verifica per confermare l'esatta ricostruzione ottenuta tramite il software AutoCad è stata quella di trovare la geometria di partenza.

Sono state quindi individuate le direttrici delle superfici di rotazione utilizzati per la definizione della geometria della volta: una volta a padiglione cioè un cilindro intersecato da altri due aventi come direttrice una circonferenza di raggio 24,65m e come distanza dal centro della circonferenza all'imposta dell'arco di 19,25 m (quindi un arco ribassato).Quindi una volta a botte che si sviluppa longitudinalmente alla lunghezza del padiglione del padiglione, e due che si sviluppano ortogonalmente e simmetricamente, con distanza dal centro di 7,5m per formare le teste del padiglione. (immagini 5.34 e 5.35). Questa verifica è stata effettuata anche per le curvature interne degli arconi ed è risultato che anche l'arcone del lato lungo parte dalla geometria di un arco ribassato con raggio di 44.70 m e distanza dal centro della circonferenza all'imposta dell'arco di 36.9 m.

Inoltre, da due diversi disegni di Nervi la volta è stata indicata con due misure diverse (probabilmente da due soluzioni diverse disegnate in due diversi momenti); perciò, si è proceduti a ridisegnarle entrambe per capire quale delle due fosse quella più attendibile. Le due misure in oggetto riguardano l'altezza della chiave dell'arco dal piano di pavimento, che dai disegni a cui si fa riferimento sono rispettivamente 13,90 m e 13,50 m. Per quanto riguarda la geometria alla base delle volte con altezze diverse è la stessa cambiando effettivamente solo le grandezze delle

circonferenze; nei prossimi paragrafi andremo a verificare quale delle due è quella più attendibile.

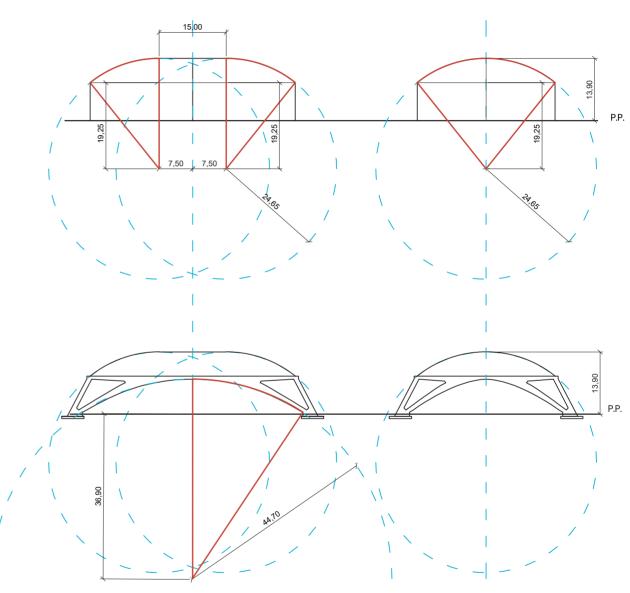


Immagine 5.34: elaborati raffiguranti la geometria di base della volta del padiglione C.

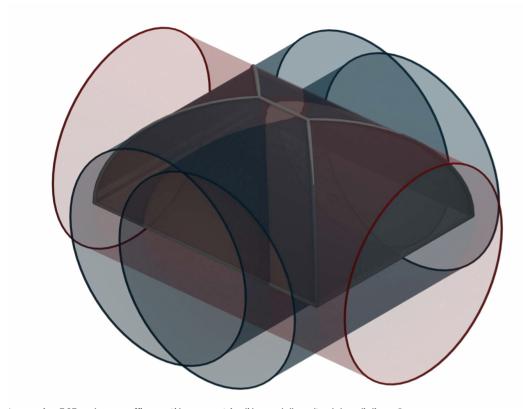


Immagine 5.35: schema raffiguranti la geometria di base della volta del padiglione C.

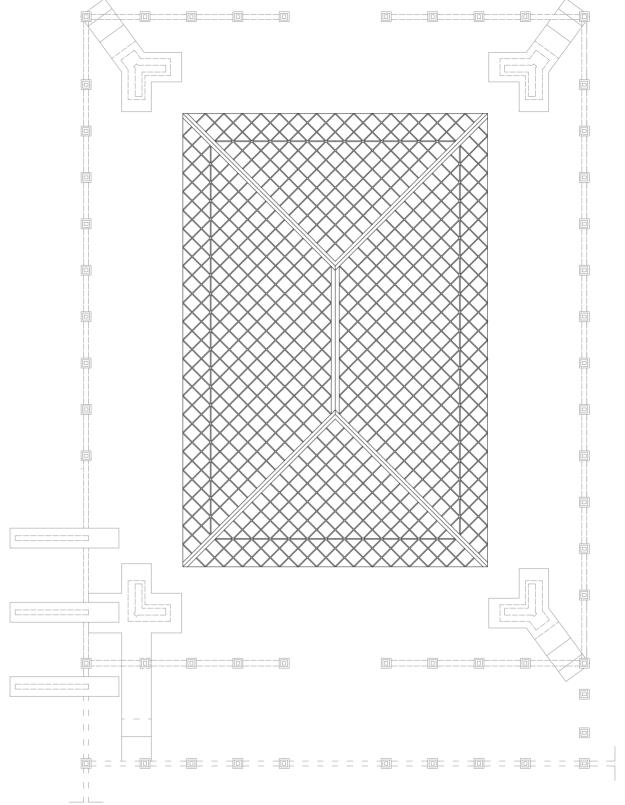
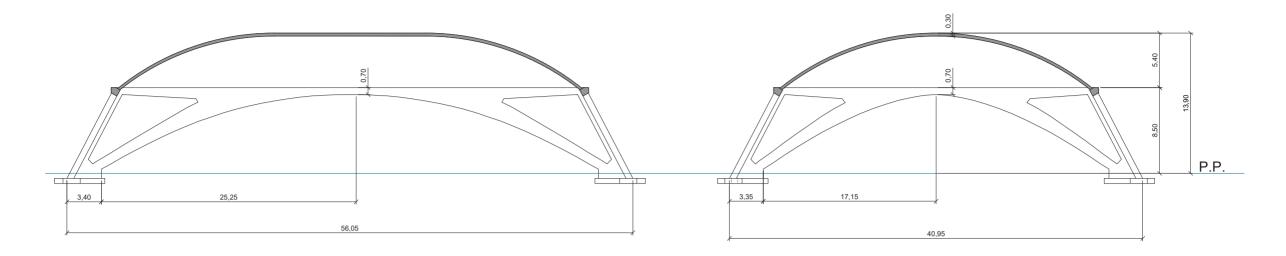


Immagine 5.36: disegno della pianta della copertura della volta in relazione alle schema delle fondazioni.



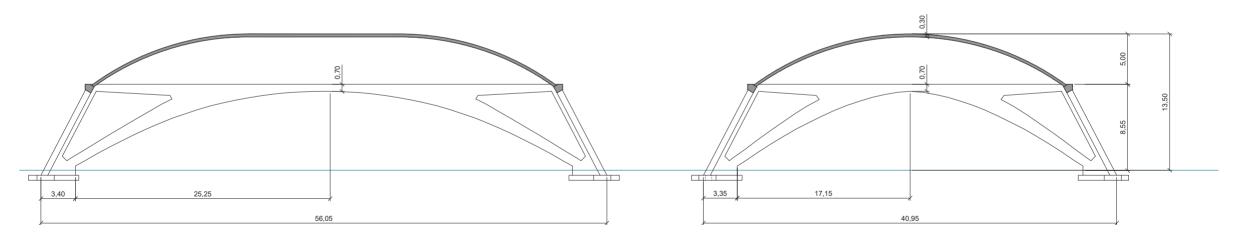
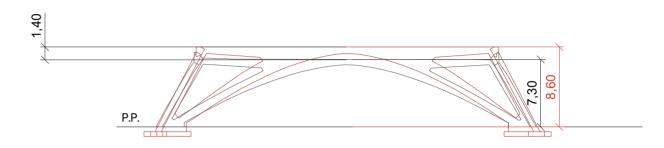


Immagine 5.37: disegno delle due soluzioni della volta con altezze diverse..

5.3.2.1 Comparazione dei disegni digitalizzati con i disegni estrapolati dalla nuvola di punti.

Dopo la rielaborazione 2D degli arconi e della volta i disegni sono stati comparati con quelli estrapolati dalla nuvola di punti (ricavati in seguito al rilievo effettuato dal gruppo di lavoro del laboratorio di geomatica del Politecnico di Torino), questa fase è risultata fondamentale per capire se dal progetto alla realizzazione siano stati apportati dei cambiamenti significativi.

Dalle comparazioni degli arconi di progetto con quelli estrapolati dalla nuvola è emerso che quelli realizzati sono più slanciati. risultando più alti in chiave rispetto a quelli di progetto di circa 1,40m. (immagine 5.38, dove in rosso sono rappresentati gli arconi del progetto originale e in nero quelli estrapolati dalla nuvola) Pertanto, per la successiva fase, ovvero la comparazione della volta, sono risultate necessarie due tipologie di verifica. Nella prima (immagine 5.40) si è tenuto come punto di riferimento il piano di pavimento (P. P. negli elaborati) mentre nella seconda, si è tenuto come punto di riferimento l'imposta della volta (immagine 5.39). Dall'immagine 5.40 è possibile notare che il profilo dell'intero padiglione (dal piano di pavimento) dei due disegni corrisponde con uno scostamento di circa 20cm. Tuttavia, le due versioni differiscono per un differente rapporto di altezza tra arconi e volta (considerandoli come elementi separati). Di fatto, prendendo in esame le due volte, dunque allineando i disegni con l'imposta della volta come punto di riferimento (immagine 5.39) la volta allo stato attuale risulta 1,15 m più alta rispetto a quella di progetto (che sommato ai 20cm di differenza di altezza tra le volte compensa ali 1,4m di scostamento degli arconi).



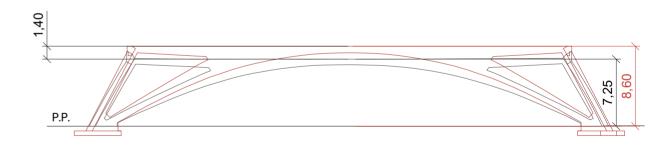
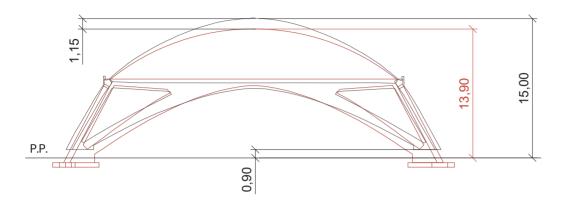
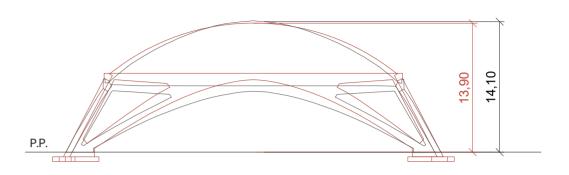


Immagine 5.38: comparazione dei disegni degli arconi ricavati dalla nuvola di punti con quelli ricavati dai disegni di progetto.

Fonte dei disegni ricavati dall nuvola: Laboratorio di geomatica.





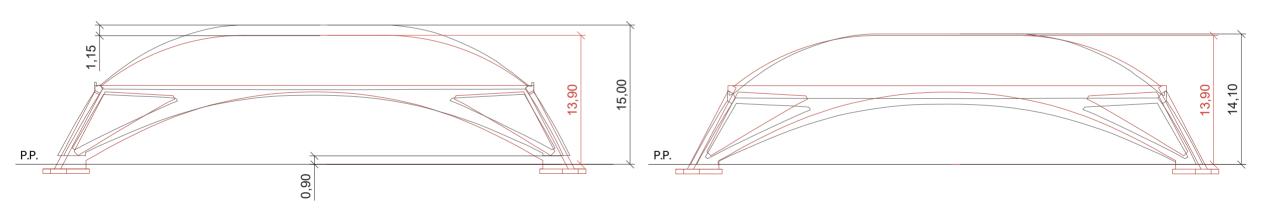
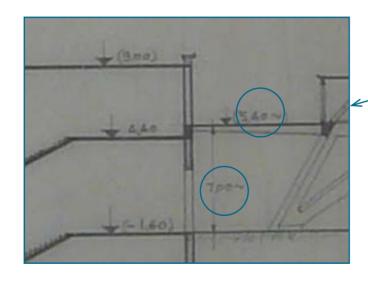


Immagine 5.39: comparazione dei disegni degli arconi e della volta ricavati dalla nuvola di punti con quelli ricavati dai disegni di progetto con delle due imposte della volta Fonte dei disegni ricavati dall nuvola: Laboratorio di geomatica. Immagine 5.40: comparazione dei disegni degli arconi e delle volte ricavati dalla nuvola di punti con quelli ricavati dai disegni di progetto con allineamento del P.P. Fonte dei disegni ricavati dall nuvola: Laboratorio di geomatica.

Successivamente, durante la prima comparazione tra gli elaborati ricostruiti in 2D e quelli estrapolati dalla nuvola di punti sono emerse, come già anticipato nei paragrafi precedenti, delle incongruenze tra stato di progetto e stato realizzato. Tuttavia si è deciso di fare un'ulteriore verifica comparando direttamente le scansioni dei disegni originali (dopo averli scalati) di Nervi con quelli ricavati dalla nuvola di punti, e le proporzioni risultano essere le medesime (immagine 5.41, in rosso il disegno degli arconi dalla nuvola di punti elaborata dal team di geomatica). La tavola utilizzata per il confronto rappresenta due sezioni generali del Padiglione con misure e quote non precise (nello zoom dell'immagine N si può vedere che per alcune misure Nervi utilizza il simbolo "circa");quindi molto probabilmente i disegni del progetto originale che sono stati utilizzati per le varie comparazioni potrebbero non essere quelli del progetto definitivo.

Questo ci fa capire quanto potrebbe essere importante digitalizzare il patrimonio architettonico (e non solo) pervenutici; infatti senza il ridisegno dei vari elementi del Padiglione C e delle varie comparazioni effettuate non saremmo potuti arrivare ad una conclusione che i disegni di cui siamo in possesso probabilmente non sono quelli del progetto definitivo.



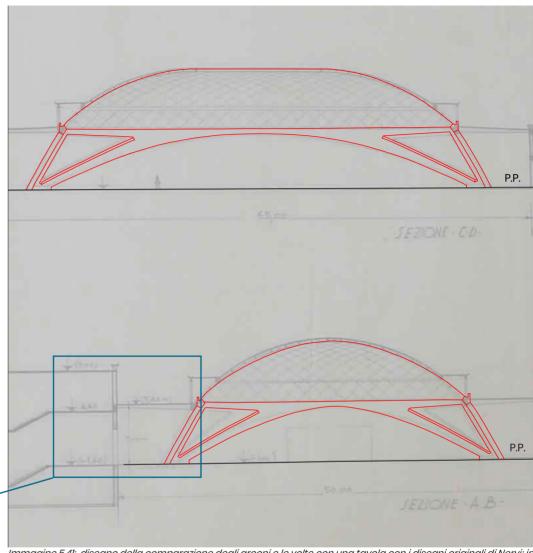


Immagine 5.41: disegno della comparazione degli arconi e le volte con una tavola con i disegni originali di Nervi; in rosso quelli che rappresentano i disegni estrapolati dalla nuvola di punti.

5.3.3 La modellazione 3D

Dopo aver ridisegnato gli elementi in 2D, il passaggio successivo è stato quello di individuare il software di modellazione 3D più appropriato per la modellazione degli elementi. Ai fini di privilegiare un software BIM è stato inizialmente valutato l'utilizzo di Archicad, tuttavia l'edificio è risultato troppo complesso da modellare con questo software. Quindi la scelta si è spostata su di un altro programma: Rhinoceros, il quale permette di sfruttare l'efficacia degli strumenti di progettazione organica a forma libera.

Rhinoceros si fonda sulla modellazione NURBS, e questo tipo di modellazione 3D può essere adattato alla nuvola di punti permettendo di effettuare una serie di verifiche; inoltre, permette di generare e rappresentare elementi 3D anche molto complessi. Altro fattore importante della modellazione NURBS è che può essere integrata in software BIM, come Revit o ArchiCAD, grazie all'utilizzo di strumenti automatici, dando la possibilità di riconoscere in automatico le geometrie primitive modellate attraverso NURBS. Questo consente di inserire e creare elementi complessi per la libreria della piattaforma BIM; fondamentale per la gestione dei dati multitemporali.

[Patrucco, G.; et al. 2022]

Una delle caratteristiche risultata utile di questo programma è stata il poter riportare i vari disegni in 2D (piante, prospetti e sezioni) nella loro esatta posizione spaziale (immagine 5.42), questo ha facilitato la fase di modellazione degli elementi curvi.

La modellazione è stata effettuata partendo dalle fondazioni (immagine 5.43) per poi arrivare agli arconi (immagine 5.44) ed infine alla volta (ordine utilizzato anche per i disegni 2D).

Una volta posizionati nello spazio i disegni di riferimento (piante e sezioni) gli elementi 2D sono stati isolati ed estrusi generando il modello tridimensionale. Per quanto riguarda i plinti delle fondazioni e pilastri perimetrali, potendoli definire elementi strutturali "standard" la modellazione tridimensionale è stata eseguita tramite l'estrusione degli elementi dai disegni 2D.

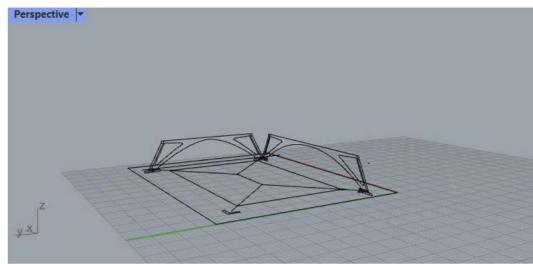


Immagine 5.42: screen effettuato dal programma Rhino.

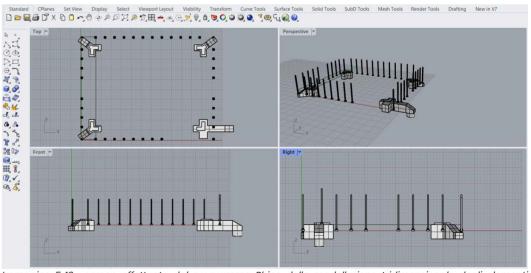


Immagine 5.43: screen effettuato dal programma Rhino della modellazione tridimensionale degli elementi strutturali delle fondazioni.

Mentre, la difficoltà maggiore è stata riscontrata per la modellazione degli arconi, che sono rappresentati da una geometria complessa, essendo a doppia curvatura (immagine 5.44), e la sezione dell'arco è variabile lungo tutto lo sviluppo dello stesso. Ciò rende inefficace i classici strumenti di disegno in 2d sui tre piani XY, XZ e YZ (Immagine 5.44), non avendo geometrie che si basano su assi ortogonali tra loro. Il rischio è quello di ottenere superfici non complanari, che si traducono in scarsa accuratezza del modello. Rhino permette tuttavia di interpolare due linee poste sui piani XZ e YZ e generarne un'unica posizionata nello spazio XYZ. Questo comando (Curve da due viste) è stato fondamentale per riuscire ad ottenere una superficie armoniosa e fedele ai disegni di partenza. La difficoltà aggiunta sta nel raccordo tra i vari elementi come quello tra arco e trave superiore, e in particolar modo quello ad angolo.

In seguito, si è passati a modellare tridimensionalmente la volta, avendo ricavato, come precedentemente anticipato, la geometria e le direttrici. Avendo due ipotesi di disegno della volta (data dalle due differenti quote relative all'altezza) e avendo appurato che la versione con maggiore fedeltà è quella con h 13,90m, è stata modellata solo quest'ultima.

Sono state dunque estrusi i profili della volta ricavati dalle sezioni precedentemente elaborate lungo gli assi x ed y (Immagine 5.45), ed eliminati i unghie dovute dall'intersezione delle due volte.

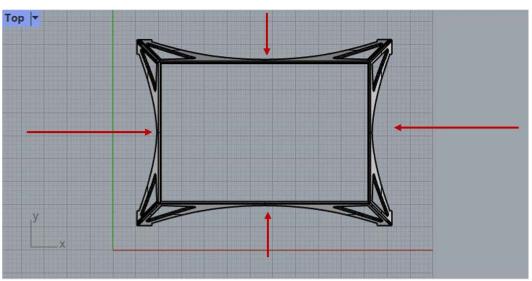


Immagine 5.44: screen effettuato dal programma Rhino con la visualizzazione degli arconi a doppia curvatura in pianta.

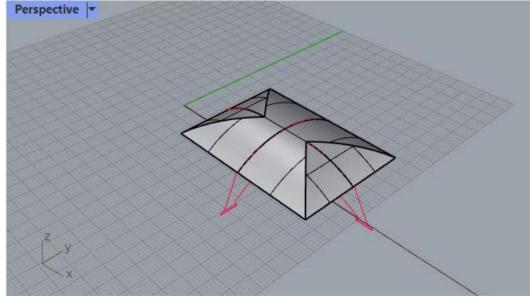


Immagine 5.45 screen effettuato dal programma Rhino raffigurante la fase di modellazione della volta.

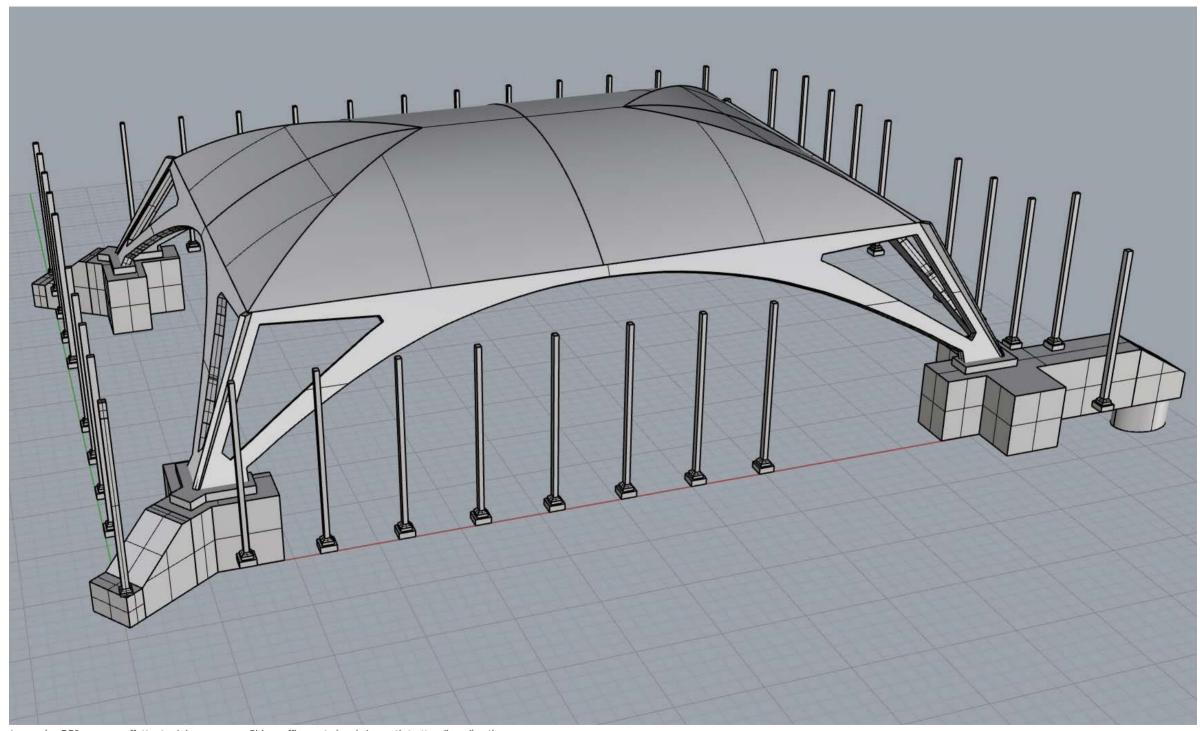


Immagine 5.50,: screen effettuato dal programma Rhino raffigurante i vari elementi strutturali analizzati.

5.3.3.1 Comparazione tridimensionale della nuvola di punti e il 3D ricavato dai disegni originali.

Come per il disegno 2D anche in questo caso, dopo aver unito tutti gli elementi modellati, è stato fatto un confronto con i dati della nuvola di punti elaborata dal laboratorio di geomatica.

La comparazione dei due modelli tridimensionali è stata molto utile per poter meglio comprendere le differenze citate nei paragrafi precedenti. È stata effettuata una analisi delle distanze tra la comparazione della nuvola di punti e il modello 3D dai disegni originali. Grazie a questo tipo di rappresentazione si può percepire in modo immediato dove e quanto i due modelli si differenziano attraverso i diversi colori delle superfici con sfumature che vanno dal rosso al blu. Come già accennato dalla comparazione dei disegni 2D:

- Comparando i modelli avendo come riferimento il piano d'imposta la volta di progetto risulta essere più bassa (nella parte più alta infatti la volta è di colore rosso, immagini 5.53 e 5.54);
- Al contrario comparando i modelli utilizzando come riferimento il piano di pavimento la volta risulta combaciare nella parte più alta discostandosi verso l'imposta (immagini 5.51 e 5.52 la volta si sfuma da colore verde al blu).

Le verifiche effettuate analizzando le distanze fra i due modelli confermano le ipotesi sostenute durante la fase di comparazione dei disegni 2D. Tuttavia questo metodo di rappresentazione si rivela più efficace e immediato per comprendere l'intero studio effettuato durante lo sviluppo della presente tesi.

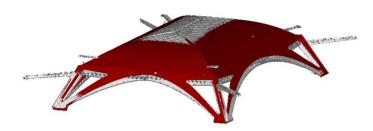


Immagine 5.51: Comparazione dei due modelli tridimensionali, in rosso il 3D dai disegni di progetto di Nervi mentri in bianco quello della nuvola di punti, con riferimento il piano di pavimento.

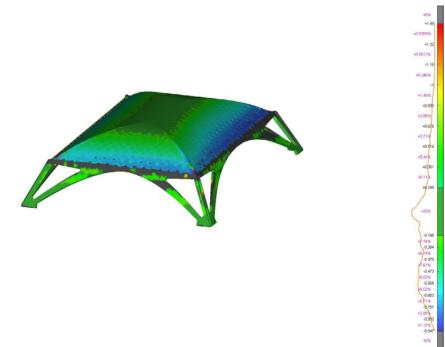


Immagine 5.52: modello dell' analisi delle distanze dell'immagine sovrastante.



Immagine 5.53: Comparazione dei due modelli tridimensionali, in rosso il 3D dai disegni di progetto di Nervi mentri in bianco quello della nuvola di punti, con riferimento l'imposta delle due volte.

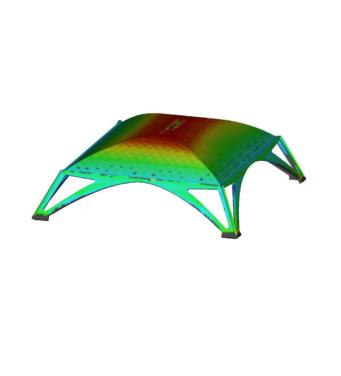


Immagine 5.54: modello dell'analisi delle distanze dell'immagine sovrastante.

CONCLUSIONI

Il presente studio si è posto l'obiettivo di evidenziare l'importanza della digitalizzazione del Patrimonio architettonico del XX secolo, di cui spesso non si riconosce il valore storico-documentale.

Il progresso tecnologico e i nuovi metodi di digitalizzazione permettono oggi di riprodurre ambienti costruiti con maggiore precisione, completezza e minor tempo di restituzione grafica. Nel lavoro di Tesi è dunque emerso quanto i nuovi strumenti e le nuove tecnologie nell'ambito della Geomatica siano in grado arricchire la documentazione che abbiamo a disposizione. La digitalizzazione del patrimonio diventa dunque uno strumento fondamentale per numerosi temi e campi di ricerca: la modellazione 3D e la tecnica di rappresentazione di un qualsiasi oggetto o ambiente costruito attraverso la digitalizzazione può diventare strumento di analisi, valutazione scientifica e di trasmissione della conoscenza.

È emersa inoltre l'importanza della multidisciplinarità e l'insieme degli strumenti utilizzati per la digitalizzazione, che si rendono indispensabili e permettono di avere una visione a 360° degli oggetti di studio: ne è un esempio pratico quello svolto in questo lavoro di tesi con l'utilizzo della nuvola di punti del Padiglione C di Torino Esposizioni alla quale si sono sovrapposte le informazioni del rilievo termico per determinare la posizione di alcuni elementi portanti altrimenti non individuabili dai soli dati ottenuti dal rilievo metrico.

L'utilizzo che si può fare dell'enorme quantità di informazioni ottenute grazie alla digitalizzazione è estremamente vasto, il lavoro di questa tesi infatti si è occupato di confrontare alcuni disegni originali (rielaborati a CAD) del Padiglione C del Complesso di Torino Esposizioni, conservati nel Centro Studi e Archivio della Comunicazione di Parma, con lo stato attuale dell'edificio (dal rilievo metrico), Dalle comparazioni iniziali, dei singoli elementi di fondazione, degli "arconi" e della volta, sono emerse una serie di variazioni tra il progetto originale e lo stato attuale. Una comparazione risultata interessante è stata effettuata dal confronto di due sezioni generali del Padiglione con misure e quote approssimate (per alcune misure Nervi utilizza il simbolo "circa") con le sezioni ricavate dal Team di Geomatica ed è emerso che queste ultime combaciano per dimensioni. E' probabile che

il disegno conservato nell'archivio non sia l'ultimo che Nervi ha effettivamente utilizzato per la realizzazione, segno questo che con tutta probabilità dalla concezione all'esecutivo vi erano una serie di passaggi di affinamento della forma strutturale finale.

Questo studio è utile a comprendere quante possibilità di utilizzo delle informazioni a disposizioni ci siano.

Si presume che con il tempo i processi di digitalizzazione saranno sempre più veloci e con sempre più quantità di dati e informazioni, con la possibilità di espandere il processo di digitalizzazione e conservazione di un insieme sempre più vasto di patrimonio architettonico

BIBLIOGRAFIA

- Achille, C.; Monti, C. (2001). Tecniche di rilevamento: nuove frontiere della tecnologia. Rilievo e rappresentazione.
- Allegrezza, S. (2015). L'affidabilità delle memorie ottiche nella conservazione a lungo termine dei documenti digitali.
 JLIS. it: Italian Journal of Library, Archives and Information Science. Rivista italiana di biblioteconomia, archivistica e scienza dell'informazione, 6(2), 101-125.
- Barbiani, C., Guerra, F., Pasini, T., & Visonà, M. (2018). Representing with Light. Video Projection Mapping for Cultural Heritage. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS
- Bertocci, S., & Bini, M. (2012). Manuale di rilievo architettonico e urbano. CittàStudio.
- Bianchini, M. (2008). Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia (Vol. 362). Roma: Aracne Editrice.
- Biasoni, A., Mondino, E. B., Bornaz, L., Tonolo, F. G., Lingua, A., & Rinaudo, F. (2006). Utilizzo delle tecniche della geomatica per la modellazione del territorio, Dipartimento di Ingegneria del territorio.
- Bonfanti, C.; Patrucco, G.; Perri, S.; Sammartano, G.; & Spanò,
 A. (2021). A New Indoor Lidar-Based MMS Challenging Complex Architectural Environments. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 46, 79-86.
- Bryan, P., Blake, B., Bedford, J., Barber, D., & Mills, J. (2013). Metric survey specifications for cultural heritage. English Heritage.

- Canziani, A. (2009). Conservazione programmata per il patrimonio architettonico del XX secolo = Planned conservation of XX Century architectural heritage. Milano: Electa.
- Carandini, F. (1925) La rocca e il borgo medioevali eretti in Torino dalla sezione [di] storia dell'arte; la figura e l'opera di Alfredo D'Andrade, Francesco Viassone, Ivrea 1925
- Ceravolo, R., de Lucia, G., Lenticchia, E., & Miraglia, G. (2019).
 Seismic structural health monitoring of cultural heritage structures. In Springer Tracts in Civil Engineering (pp. 51–85).
 Springer
- Ceravolo, R., Lenticchia, E., Sapnò A. (2019). The Halls of Turin Exhibition Center by Pier Luigi Nervi: a multi-disciplinary approach for its diagnosis and preservation. Keeping it Modern – Planning Grant 2019
- Chiabrando, F., Lingua, A., & Piras, M. (2013). Direct photogrammetry using UAV: tests and first results. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci, 1, 81-86.
- Cina, A. Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System) per la Geomatica. Celid, Torino, 2014.
- Desideri, P.; Nervi, P. L.; Positano, G. (1979). Pier Luigi Nervi. Bologna: Zanichelli.
- Dischinger, F. (1935). Die rotationsschalen mit unsymmetrischer form und belastung. Bauing, 16, 35–38.

- Donadio, E., Sambuelli, L., Spanò, A., & Picchi, D. (2018). Three-Dimensional (3D) modelling and optimization for multipurpose analysis and representation of ancient statues. Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling; Remondino, F., Georgopoulos, A., González-Aguilera, D., Agrafiotis, P., Eds, 95-118.
- Greco, C. (2008). Pier Luigi Nervi: dai primi brevetti al palazzo delle esposizioni di Torino 1917-1948. Lucerna: Quart Edizioni.
- Greco, C. (2019) KEYNOTE: THE BIOGRAPHY OF OBJECTS, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W11, 5–10, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-5-2019.
- Harboe, G., Espinosa de los Monteros, F., Landi, S., & Normandin, K. C. (2021). The Cádiz Document: Innova Concrete Guidelines for Conservation of Concrete Heritage.
- Hindmarch, J. (2016). Investigating the use of 3D digitisation for public facing applications in cultural heritage institutions (Doctoral dissertation, UCL (University College London)).
- ICOMOS. ISC20C. Approaches to the conservation of Twentieth-century cultural heritage Madrid – New Delhi Document, 2017. in: http://www.icomos-isc20c.org/madriddocument/ - Consultato il 29/06/2022
- Iori, T. (2009). Pier Luigi Nervi. Milano: Motta architettura.
- Iori, T., & Poretti, S. (2008). Pier Luigi Nervi: l'Ambasciata d'Italia a Brasilia. Milano: Electa.
- Kraus, K. (1994). Fotogrammetria. Vol. 1-Teoria e applicazioni. Libreria Universitaria Levrotto & Bella, Torino.

- Lo Buglio, D., De Luca, L.. (2011). Critical review of 3D digitization methods and techniques applied to the field of architectural heritage: methodological and cognitive issues.
- Lo Buglio, D., De Luca, L. (2017). Representation of architectural artifacts: definition of an approach combining the complexity of the 3d digital instance with the intelligibility of the theoretical model. SCIRES-IT-SCIentific RESearch and Information Technology.
- Meschini, A. (2011). Tecnologie digitali e comunicazione dei beni culturali. Stato dell'arte e prospettive di sviluppo. Disegnarecon.
- Mikhail, E. M.; Bethel, J. S.; & McGlone, J. C. (2001). Introduction to Modern Photogrammetry, John Wiley & Sons. Inc., New York.
- Mikhail, E. M., Bethel, J. S., & McGlone, J. C. (2001). Introduction to Modern Photogrammetry, John Wiley & Sons. Inc., New York.
- Normal, R. (1990). 1/88: Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: Lessico. CNRICR, Roma.
- Nervi, P. L. (2012). Cantiere Nervi: la costruzione di un'identità; storie, geografie, paralleli. (a cura di Bianchino, G. Costi, D.). Milano: Skira.
- Nervi, P. L. (2010, ristampa del 1965). Costruire correttamente.
 Milano: Hoepli.
- Nervi, P. L. (1980). Pier Luigi Nervi e la sua opera: incontro di studio organizzato dal Comitato del Premio Ingersoll Rand Italia. Milano: Circolo della Stampa.

- Nervi, P. L. (1950). La struttura portante del nuovo Salone del Palazzo di Torino Esposizioni, A&RT della società degli ingegneri e architetti in Torino, N. 1-3.
- Nervi, P. L. (1948). Le strutture portanti del Palazzo per le Esposizioni al Valentino, A&RT della società degli ingegneri e architetti in Torino. N. 7.
- Nicoloso, P. (2018). Marcello Piacentini. Architettura e potere: una biografia. Gaspari.
- Olmo, C., Chiorino, C. (Eds.). (2010). Pier Luigi Nervi: architettura come sfida, Silvana Editoriale
- Pagliari, P.; (2011). L'archivio di Pier Luigi Nervi Presso il CSAC: il materiale iconografico. In: Vernizzi, C. (2011) Il disegno in Pier Luigi Nervi. Dal dettaglio della materia alla percezione dello spazio. Fidenza: Mattioli.
- Patrucco, G., Perri, S., Sammartano, G., Fillia, E., Matteini, I., Lenticchia, E., Ceravolo, R., and Spanò, A.: 3D MODELS AND NON-DESTRUCTIVE INVESTIGATIONS: TOWARDS A MEETING IN DIGITAL TWINS, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B2-2022, 845-852, https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLIII-B2-2022-845-2022, 2022.
- Patrucco, G., Cortese, G., Tonolo, F. G., & Spanò, A. (2020).
 Thermal and optical data fusion supporting built heritage analyses. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 619-626.
- Salvadori, M., & Brandolini, S. (2009). Perché gli edifici stanno in piedi. Bompiani.

- Sammartano, G., Patrucco, G., Perri, S., Ceravolo, R., Lenticchia, E., & Spanò, A. (2021). DOCUMENTING COMPLEXITY FOR THE 20TH CENTURY HERITAGE: THE ENRICHED 3D MODELS OF THE TURIN EXPOSITION NERVI'S HALLS DIGITIZATION. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
- Sammartano, G., & Spanò, A. (2018). Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. Applied Geomatics, 10(4), 317-339.
- Solomita, P. (2012). Pier Luigi Nervi architetture voltate. Verso nuove strutture. Roma: Fondazione Bruno Zevi.
- Small, C. (2006). Comparative analysis of urban reflectance and surface temperature. Remote Sensing of Environment, 104(2), 168–189. https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.029
- Spanò, A. (2018). Misura degli angoli. Dispense di Topografia.
- Spanò, A.; Chiabrando, F. (2009). Gli strumenti della geomatica per la conoscenza del paesaggio urbano e dell'edificato.lentile R.; Romeo E. (a cura di) La conservazione dell'architettura e del suo contesto. Protocollo per la valutazione integrata del patrimonio di Pinerolo, Torino, Celid
- Spanò, A., Donadio, E., & Chiabrando, F. (2017). Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili. EUT Edizioni Università di Trieste.
- Spanò, A. (2019-2020) Principi di Fotogrammetria. Dispense Workshop.
- Spanò, A. (2019-2020) Rilievo metrico 3D-aspettiorganizzativi. Dispense Workshop.

- Surace, L. (1998). GPS sistemi di riferimento e cartografia. GEOmedia, 2(1).
- Torino Esposizioni. 1947- 1948. Torino Esposizioni (pubblicazione per il decennale per la Società Torino Esposizioni).
- Verhoeven, G. (2011). Taking computer vision aloft–archaeological three\(\text{Mdimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan. Archaeological prospection, 18(1), 67-73.
- Vernizzi, C. (2011) Il disegno in Pier Luigi Nervi. Dal dettaglio della materia alla percezione dello spazio. Fidenza: Mattioli.

TESI:

- Avena, M. (2020). Dalla nuvola di punti all'UrbanBim. Tecniche integrativa di rilievo 3D per la generazione di un modello multiscala di città in scenario post-sismico. Il caso studio di Norcia (PG). Relatori: Spano, A.; Abbate, E.
- Ferrarino, A.; Pangallo, A. (2021). Digitalizzazione del Patrimonio Culturale per una migliore accessibilità. Virtual reality per i ninfei della città antica di Hierapolis. Relatore: Nannina Spanò; Correlatori: Campagna, L.; Teppati Losè, L.
- Guarino, P. (2021). Analisi dello stato di conservazione delle strutture in ferrocemento dell'Ing. Pierluigi Nervi. Tesi Magistrale. Relatore: Prof. Ing. Francesco Tondolo
- Lenticchia (2017)Vibration-based monitoring of complex architectural heritage buildings. Supervisore: Prof. Rosario Ceravolo (tesi di dottorato)
- Orlandi, M. (2012). La Ricostruzione 3D di Bologna nel XVI Secolo. Alma Mater Studiorum – Università di Bologna. Relatore: Smurra, S.

 Viotti, A., Zocco, C. (a.a. 2018/2019). TOEXPO E IL PARCO. Dal progetto della decisione al progetto degli effetti. Tesi di Laure Magistrale, Politecnico di Torino. Relatori: Durbiano, G. Fabrizio, E.

SITOGRAFIA:

- https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/ keeping_it_modern/grants_awarded_2019.html Ultima visita: 30/06/2022
- https://historicengland.org.uk/ Ultima visita: 29/06/2022
- https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/ keeping_it_modern/index.html Ultima visita: 30/06/2022
- https://www.unesco.it/it/Documenti/Detail/180 Ultima visita: 30/06/2022
- https://www.cipaheritagedocumentation.org/Ultima visita: 30/06/2022
- https://pierluiginervi.org/what-we-do/

INDICE DELLE IMMAGINI

CAPITOLO 1

- 1.1: https://paladinstudios.com/2007/09/17/hof-van-dor-drecht/
- 1.2: Spanò, A., Donadio, E., & Chiabrando, F. (2017). Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili. EUT Edizioni Università di Trieste.
- 1.4: https://www.mondogeo.it/Pagine_100/pagina_06.html. Ultima visita 19/06/2022
- 1.5: https://www.researchgate.net/figure/The-principle-of-DGNSS-NovAtel-2017-The-Master-Station-is-a-point-whe-re-the_fig9_342708517 Ultima visita 18/06/2022. Ultima visita 17/06/2022
- 1.6: Cina, A. Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System) per la Geomatica. Celid, Torino, 2014
- 1.7: https://faradsrl.it/scheda/stazione-totale-leica-ts10/
- 1.8: https://www.3eyegeomapping.it/articoli/strumentazione-topografica-la-stazione-totale-in-un-rilievo-fotogrammetrico/
- 1.9; 1.10: Lingua, A. Marenchino, D. La visione stereoscopica naturale e artificiale, la restituzione fotogrammetria. Dispense di fotogrammetria applicata, 2007
- 1.11: www.sony.it. Ultima visita 19/06/2022
- 1.12: , www.canon.it. Ultima visita 19/06/2022
- 1.13: www.gopro.com. Ultima visita 19/06/2022

- 1.14: http://www.san-lo.com/photogrammetry.html
- 1.15: https://www.horusdynamics.com/vendita-droni/dji-mavic-mini-fly-more-combo/. Ultima visita 16/06/2022
- 1.16 : https://geotopo.ch/dienstleistungen/3d-geomatik/ mobile-mapping/. Ultima visita 19/06/2022
- 1.17: https://www.aerolaser.es/en/zona_productos/integrations/aesystem-480ii-580ii/5.html.Ultimavisita16/06/2022
- 1.18: https://shop.laserscanning-europe.com/Noleggio-del-lo-scanner-laser-FARO-FocusS-70. Ultima visita 16/06/2022
- 1.19: Bonfanti, C.; Patrucco, G.; Perri, S.; Sammartano, G.; & Spanò, A. (2021). A New Indoor Lidar-Based MMS Challenging Complex Architectural Environments. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 46, 79-86.

CAPITOLO 2

- 2. 1: https://www.espazium.ch/it/archi3-20_nervi
- 2.2: https://www.flickr.com/photos/barlongue/3529956809
- 2.3: https://schwartz.arch.ethz.ch/Seminarwochen/Fj_2018/ index.php?lan=de&dianr=2
- 2.4: https://www.artribune.com/progettazione/architettura/2019/07/getty-foundation-sostiene-la-conservazione-delledificio-torino-esposizioni-di-pier-luigi-nervi/
- 2.5; 2.6; 2.7; 2.8: http://www.fontecedro.it/blog/pierluigi-ner-vi-6-aviorimesse-1939-42

- 2.9: -Solomita, P. (2012). Pier Luigi Nervi architetture voltate Verso nuove strutture. Roma: Fondazione Bruno Zevi. (p.p. 32)
- 2.10: https://www.torinotoday.it/attualita/torino-esposizioni-visite-gratuite-padiglione3-.html
- 2.11: https://www.teknoring.com/news/progettazione/ pier-luigi-nervi-per-le-olimpiadi-di-roma-un-sistema-mai-eguagliato/
- 2.12: https://www.neverendingseason.com/architettura-sport-genio-nervi/

CAPITOLO 3

- 3.1; 3.2; 3.3; 3.7; 3.9; 3.26; 3.28: https://www.scr.piemonte.it/sites/default/files/bandi_di_gara/documenti/Capitolato%20 prestazionale%20%2867-2015%29.pdf
- 3.4: https://casabellaweb.eu/the-magazine/yearanna-ta-1939-xii/
- 3.5: http://www.architetti.san.beniculturali.it/web/architetti/progetti/scheda-progetti?p_p_id=56_INSTANCE_hlz4&articleld=21218&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&groupld=10304&viewMode=normal
- 3.6: https://www.museotorino.it/view/s/78d55387d3fe-43e5b4f18095d3ea7288
- 3.8; 3.10: Ceravolo, R., de Lucia, G., Lenticchia, E., & Miraglia, G. (2019). Seismic structural health monitoring of cultural heritage structures. In Springer Tracts in Civil Engineering (pp. 51–85). Springer

- 3.11: https://www.museotorino.it/view/s/873838d5a4804dc-88134dc23d624c8f3
- 3.12: https://artoblog.it/torino-esposizioni/
- 3.13https://www.teknoring.com/news/riqualificazione-urbana/un-nuovo-futuro-per-il-palazzo-esposizioni-di-pier-luigi-nervi-a-torino/
- 3.14; 3.15; 3.17; 3.18: Greco, C. (2008). Pier Luigi Nervi: dai primi brevetti al palazzo delle esposizioni di Torino 1917-1948. Lucerna: Quart Edizioni. P.p. 228-229
- 3.16: http://www.torinoesposizionigetty.polito.it/history/torino_esposizioni
- 3.19; 3.20; 3.22;3.24; 3.27: Centro Studi e Archivio della Comunicazione
- 3.21: https://www.artribune.com/arti-visive/arte-contem-poranea/2019/07/correva-anno-1891-nascita-pier-lui-gi-nervi-alberto-savinio-divisionismo/attachment/palaz-zo-delle-esposizioni-torino/
- 3.23: https://architecturefarm.wordpress.com/2013/11/09/torino-esposizione-c/
- 3.25: http://costruirecorrettamente.org/
- 3.29: Archivio FIAT
- 3.31; 3.32; 3.33; 3.34; 3.35; 3.36; 3.37; 3.38; 3.39; 3.40; 3.41; 3.42:
 Greco, C. (2008). Pier Luigi Nervi: dai primi brevetti al palazzo delle esposizioni di Torino 1917–1948. Lucerna: Quart Edizioni. P.p. da 136 a 139.
- 3.43: immagine del laboratorio di geomatica

- 3.44; 3.45; 3.46; 3.48: Archivio privato Ing. Ravelli
- 3.50: Guarino, P. 2021. Analisi dello stato di conservazione delle strutture in ferrocemento dell'Ing. Pierluigi Nervi. Tesi Magistrale. Relatore: Prof. Ing. Francesco Tondolo.
- 3.51; 352: Archivio Biblioteca di Scienze Tecnologiche di Firenze
- 3.53: https://www.lavocetorino.it/the-phair-riparte-da-tori-no-la-stagione-delle-fiere-darte/

CAPITOLO 4

- 4.1:https://www.arteintorino.com/visite-guidate/bor-go-medievale.html
- 4.2: https://www.museotorino.it/view/s/f987e76510294fa-9852817e2e715dq5q
- 4.4; 4.7; 4.8; 4.9: Sammartano, G., Patrucco, G., Perri, S., Ceravolo, R., Lenticchia, E., & Spanò, A. (2021). DOCUMENTING COMPLEXITY FOR THE 20TH CENTURY HERITAGE: THE ENRICHED 3D MODELS OF THE TURIN EXPOSITION NERVI'S HALLS DIGITIZATION. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

CAPITOLO 5

5.1: Ceravolo, R., de Lucia, G., Lenticchia, E., & Miraglia, G. (2019). Seismic structural health monitoring of cultural heritage structures. In Springer Tracts in Civil Engineering (pp. 51–85). Springer

5.2; 5.6; 5.7; 5.8; 5.9; 5.10; 5.23; 5.24; 5.25; 5.27; 5.28;5.29; 5.30;
 5.31; 5.32; 5.33; 5.41: Centro Studi e Archivio della Comunicazione di Parma

A conclusione di questo mio percorso vorrei dedicare questo spazio a tutte le persone che mi sono state vicine e che con il loro supporto mi hanno aiutato ad arrivare a questo traguardo.

Innanzitutto ringrazio infinitamente la mia relatrice, Antonia Spanó, sempre pronta ad aiutarmi e a darmi le giuste indicazioni in ogni fase di questo mio percorso. Grazie a lei ho accresciuto le mie competenze e conoscenze.

Ringrazio il mio correlatore Stefano che insieme a Giacomo mi sono stati sempre vicini e mi hanno aiutato durante tutto questo percorso rendendolo meno faticoso.

Ringrazio i miei genitori, Anna e Luigi, che mi hanno insegnato i valori della vita e che non mi hanno mai lasciato sola. A voi devo tutto, è grazie al vostro esempio di vita che sono riuscita ad arrivare fin qui.

Ringrazio nonna Maria e nonno Salvatore, che mi hanno insegnato a non mollare mai. Il mio amore per voi è infinito.

Ringrazio kekka, mia sorella che non hai mai smesso di credere in me e mi è sempre stata vicina nonostante i chilometri di distanza. Insieme lei e Genni sono stati per me fondamentali per arrivare fin qui, senza il loro appoggio non ce l'avrei fatta.

Ringrazio Gennaro, mio compagno di vita, di avventure e sventure. Grazie per essermi stato sempre vicino, per avermi aiutato nei momenti belli ma soprattutto in quelli brutti. Se sono arrivata fin qui non è anche grazie a te ma soprattutto grazie a te.

Ringrazio Tonino, Rosaria, Nicola e Jessika che in questi anni sono stati la mia seconda famiglia.

Infine non per meno importanza ringrazio i miei amici più cari. Ringrazio Massimo, Gloria, Alice, Giggio, Jack, Mario, Guido, Tore, Roberta, Camilla e Francesco. Ringrazio voi infinitamente; per chi c'è sempre stato e per chi è arrivato da poco. Grazie amici per le belle giornate insieme, per le risate, per il vostro supporto e per, alcuni di voi,di essere stati la mia famiglia qui a Torino.