

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Corso di Laurea Magistrale a ciclo unico in Ingegneria Edile e Architettura

DIGITAL STEREOTOMICS: L'APPARECCHIATURA ELICOIDALE DEI PONTI OBLIQUI.

"PONTE A GRISIGNANO DI ZOCCO"

Relatori:

Prof. Arch. Andrea Giordano

Prof. Ing. Maria Rosa Valluzzi

Dott. Arch. Cosimo Monteleone

Laureando:

Diego Damiata

ANNO ACCADEMICO 2013/14

INDICE

SOMMARIO.....	9
1. INTRODUZIONE.....	11
2. LA SCIENZA STEREOTOMICA.....	15
2.1. Introduzione alla Stereotomia	15
2.2. Nozioni di Stereotomia “ <i>l’art du trait géométrique</i> ”	17
2.3. La Tecnica Stereotomica.....	18
2.4. Dalle origini verso la Stereotomia moderna.....	22
2.5. Aggiornamento della Stereotomia: gli strumenti informatici.....	25
2.6. Verso una progettazione Stereotomica.....	28
3. ANALISI STORICA DEI PONTI OBLIQUI.....	31
2.1. Introduzione.....	31
2.2. Archi e Volte Oblique dal XV al XIX secolo.....	32
4. ANALISI STRUTTURALE DEI PONTI AD ARCO IN MURATURA.....	41
4.1. Generalità.....	41
4.2. Fondazioni.....	42
4.3 Spalle.....	44
4.4. Pile.....	46
4.5. Rinfianco, Cappa, Riempimento.....	47
4.6. Timpani.....	47
4.7. Muri d’ala.....	48
4.8. Archivolto.....	48
4.9. Arcate per volte oblique.....	51
5. GLI STUDI DI JOSEPH ALPHONS ADHÉMAR.....	53
5.1. Biografia e Bibliografia.....	53
5.2. Lo studio dei ponti obliqui.....	54
5.3. L’apparecchiatura ortogonale.....	56
5.4. Le nozioni sul taglio e la posa dei conci.....	59
5.5. Le nozioni di natura statica.....	61
5.6. L’apparecchiatura elicoidale.....	63

6. ANALISI GEOMETRICA DELL'APPARECCHIATURA ELICOIDALE.....	67
6.1. Introduzione.....	67
6.2 Geometria dell'apparecchiatura elicoidale.....	69
7. IL METODO DELLA FOTOMODELLAZIONE ARCHITETTONICA.....	81
7.1. Introduzione.....	81
7.2. Dalla Fotogrammetria alla Fotomodellazione.....	82
7.3. La Fotomodellazione applicata all'Architettura.....	83
7.4. La Calibrazione e l'Orientamento delle camere.....	84
7.5. La Restituzione geometrica Bidimensionale.....	86
7.6. La Restituzione geometrica dal modello Tridimensionale.....	88
7.7. Le Potenzialità e i limiti della Fotomodellazione.....	89
8. CASO STUDIO: PONTE A GRISIGNANO DI ZOCCO.....	91
8.1 Cenni storici e Localizzazione dell'opera.....	91
8.2 Le operazioni di rilievo.....	93
8.3 La Restituzione delle Ortofografie.....	95
8.4 La restituzione del Modello tridimensionale.....	99
8.5 La misurazione del modello e il Calco degli elementi.....	103
8.6. Verifica regola dell'Apparecchiatura Elicoidale.....	107
8.6.1. Costruzione e Sviluppo del <i>Modello reale</i>	107
8.6.2. Costruzione e Sviluppo del <i>Modello ideale</i>	109
8.6.3. Confronto tra i modelli.....	114
8.7. Verifiche Sismiche.....	115
8.7.1. Quadro normativo di riferimento.....	115
8.7.2. Approccio cinematico e Analisi plastica dell'arco in muratura.....	116
8.7.3. L'automatizzazione della procedura.....	117
8.7.4. Descrizione della geometria strutturale.....	121
8.7.5. Livello di Conoscenza.....	123
8.7.6. Azione sismica e Spettri di Risposta.....	123
8.7.7. Analisi della risposta sismica della struttura.....	125
8.7.8. Valutazione della vulnerabilità sismica dell'arco.....	126
8.7.9. Verifica allo Stato Limite di Danno (<i>SLD</i>).....	129
8.7.10. Verifica Lineare allo Stato Limite Ultimo (<i>SLU</i>).....	129
8.7.11. Verifica NON Lineare allo Stato Limite Ultimo (<i>SLU</i>).....	131

9. CONCLUSIONI.....	131
10. BIBLIOGRAFIA.....	167

SOMMARIO

Il lavoro svolto nell'ambito di questa tesi è sostanzialmente diviso in tre parti; una prima parte, partendo da un'analisi storica, affronta l'interpretazione geometrica e costruttiva di un sistema stereotomico complesso (*l'apparecchiatura elicoidale dei ponti obliqui*), attraverso la ricerca delle nozioni tecniche e teoriche, alla base di questa scienza, e l'utilizzo dei moderni *software* di modellazione CAD/3D, per la restituzione e la comprensione della geometria nello spazio.

La seconda parte ha riguardato uno studio relativo alle differenti fasi del processo della *fotomodellazione architettonica*, metodo che ha permesso una ricostruzione tridimensionale e una rappresentazione basata sulle immagini fotografiche, partendo da un'operazione di rilievo e restituzione geometrica e materica dell'opera scelta: *Il cavalca-ferrovia a Grisignano di Zocco*.

La terza parte è stata incentrata sull'applicazione delle nozioni tecniche e teoriche assunte nelle prime due parti, attraverso le quali è stato possibile condurre un'analisi dell'opera sia dal punto di vista costruttivo, con il rispetto della regola dell'arte, sia dal punto di vista della vulnerabilità sismica, in relazione alla normativa italiana ad oggi in vigore, traendo le dovute conclusioni sull'opportunità tecnologica che questo tipo di apparecchiatura ha incarnato tra fine Ottocento e gli inizi del Novecento.

1. INTRODUZIONE

L'architettura stereotomica comporta la realizzazione di costruzioni in pietra da taglio composte da elementi realizzati fuori opera secondo accurati processi di prefabbricazione, il cui insieme costituisce un'apparecchiatura che lavora a compressione grazie alla sua forma e alle regole geometriche implicite delle parti che la compongono. La Stereotomia è quindi la scienza che studia il taglio dei solidi, e ha come oggetto la costruzione di conci in legno o in pietra da taglio. Alla luce della rivoluzione innescata dal cemento armato nell'architettura la scienza stereotomica può essere considerata di primo acchito, se non morta, certamente in disuso; tuttavia il fascino del suo straordinario passato ancora ci raggiunge, soprattutto nell'osservazione di quelle opere che, ancora oggi, si rivelano nella loro straordinaria fattura, inoltre, la necessità stringente di costruire edifici sostenibili ha portato questa tecnica costruttiva nuovamente alla ribalta.

L'interesse odierno per la stereotomia deriva dalle profonde relazioni che legano la scienza del taglio delle pietre alla moderna scienza della rappresentazione e ancor prima alla geometria descrittiva.

In maniera sommaria, e forse anche azzardata, la paternità della geometria descrittiva è stata spesso attribuita a Gaspard Monge¹ (1746-1818), ma come per la genesi di tutte le scienze, anche per la geometria descrittiva sarebbe riduttivo ignorare quei contributi teorici e pratici che stanno alla base del suo fondamento. Fra questi contributi trovano collocazione gli studi dedicati alla scienza del taglio delle pietre, ma ancor prima l'architettura costruita che testimonia, nella prassi dei processi progettuali, come alla base dell'arte del taglio delle pietre sussista una corrispondenza irrinunciabile fra modello, disegno e realizzazione dell'opera, secondo una concezione oggi di grande attualità, che fa di questa corrispondenza la struttura portante della moderna scienza della rappresentazione.

Questo studio trae ispirazione dall'analisi di una parte dell'opera monumentale scritta da Joseph Alphons Adhémar (1797-1862) nella prima metà del Ottocento², interamente dedicata alla stereotomia, con l'obiettivo di comprendere a fondo, attraverso la rilettura e l'analisi di una parte del

¹ G. Monge conte di Péluse. (Beaune, 1746–Paris, 1818). Matematico francese, studiò nella scuola militare di Mézières (*VEDI NOTA 83*), dove fu poi docente di matematica (1768-80). Monge si fece conoscere pubblicando lavori relativi all'applicazione dell'analisi alla geometria, ed ebbe così (1780) la nomina a membro dell'*Académie des sciences de Paris*.

² ADHÉMAR, J. A., *Cours de mathématiques à l'usage de l'ingénieur civil*, Bachelier, Paris 1832-56, (14 volumi).

trattato³, specificatamente quella dedicata ai ponti obliqui, la portata dei contributi dell'opera del teorico francese, con particolare attenzione per l'apparecchiatura elicoidale.

Per questo motivo, inizialmente si è posta l'attenzione sul panorama di quelle opere dedicate all'arte del taglio delle pietre, ripercorrendo la storia della stereotomia attraverso le sue tappe fondamentali, alla ricerca della trasformazione di quella che per secoli è stata l'arte dei tagliatori di pietre, che con il Rinascimento inizia un lento processo di emancipazione uscendo dal segreto corporativo per diventare una scienza propriamente detta.

Inoltre l'affinamento della teoria delle superfici, in particolare il controllo delle superfici rigate e sviluppabili, ha prodotto risvolti significativi in stereotomia, dimostrati dalle numerose realizzazioni di apparecchiature di volta in volta più sofisticate e raffinate.

In secoli più recenti la ricerca nel campo della geometria descrittiva sembra essersi dedicata al perfezionamento dei metodi di rappresentazione grafica. Così sembra aver perso quella originale vocazione, che, fino al secolo scorso, ha reso questa scienza uno strumento indispensabile per comprendere le proprietà delle figure geometriche nello spazio. Oggi, l'evoluzione delle tecniche costruttive, l'uso di materiali con caratteristiche innovative e per ultimo, ma non meno importante, gli strumenti digitali usati sempre più spesso nelle lavorazioni e nelle operazioni di rappresentazione, incoraggia l'uso di forme complesse in architettura. La necessità di un controllo rigoroso di tali geometrie, e la capacità di immaginazione, è un'occasione per riscoprire il valore della geometria descrittiva e della Stereotomia ad essa certamente collegata.

I metodi grafici di rappresentazione più moderni sono interamente fiancheggiati dalla tecnologia digitale, che agevola la descrizione di linee, superfici e volumi direttamente nello spazio, in modo continuo e con alti livelli di precisione. Rappresentare direttamente i problemi di geometria descrittiva nello spazio, sebbene fino ad oggi siano stati risolti nel piano, permette di verificare le proprietà intrinseche di linee e superfici, relazionandole tra di loro. La rilettura del patrimonio classico della stereotomia della pietra può essere indirizzata in base a delle precise istanze di rinnovamento: con il fine di ottenere nuove competenze scientifiche sia nel campo degli studi sulla geometria configurativa degli spazi e delle superfici; con lo scopo di studiare il comportamento dei materiali lapidei e della progettazione cantieristica, spingendo verso un rinnovamento della produzione di manufatti e di componenti per l'edilizia.

In questo senso l'utilizzo del metodo della *fotomodellazione architettonica* risulta essere parecchio efficace ed innovativo, da un lato per la relativa semplicità ed economicità del processo, ma soprattutto per la quantità e la qualità di informazioni reperibili da una singola campagna di rilievo, che fa di questo metodo uno strumento di rappresentazione eccezionale.

³ *Ibidem*, *Ponts biais en pierre et en bois*. L. VII, CAP. III, pp. 373-414.

La rivisitazione delle opere di stereotomia classica con i *software* più moderni ha quindi due diversi scopi: rintracciare nella stereotomia i fondamenti della geometria descrittiva e rivisitare i modelli costruttivi che, nella risoluzione di condizioni complesse, mantengono ancora la loro attualità.

2. LA SCIENZA STEREOTOMICA

2.1. Introduzione alla Stereotomia

Gottfried Semper (1803-1879) in *“Die vier Elemente der Baukunst”*⁴, rifiutando indirettamente l’interpretazione della capanna primitiva, quale punto di partenza dell’architettura, individua i quattro termini fondativi dell’abitazione che, per il teorico tedesco è costituita da: basamento, focolare, intelaiatura-tetto e membrana di chiusura. Secondo questa suddivisione tassonomica, Semper suddivide l’arte del costruire in due “evoluzioni” fondamentali: la *tettonica dell’intelaiatura* e la *stereotomia del basamento*.

In seguito Kenneth Frampton (1930), nell’analisi del rapporto costruzione—architettura, assumendo l’impostazione teorica di Semper, focalizza la sua attenzione sulla dialettica dei termini “tettonico” e “stereotomico”⁵.

All’interno di tale ipotesi, basata sul valore della tecnica costruttiva quale categoria critica dell’architettura, i due termini sono esemplificati in: opere di terra e costruzioni pesanti (stereotomia, dal greco *styreos* “taglio dei solidi”) e opere di copertura e costruzioni leggere (tettonica, *tektion* che in greco antico significa “carpentiere”). Traducono questi concetti i termini inglesi *Earthwork* e *roofwork* che sono, quindi, paradigmatici, due modi di costruire dialetticamente opposti, attraverso i quali è possibile leggere, interpretare e indirizzare il progetto d’architettura. Frampton, come Semper, nell’uso allargato dei due concetti “tettonico” e “stereotomico”, riduce la stereotomia a generica tecnica di costruzione “pesante e massiva” (organismi o elementi architettonici, portanti e schermanti), contrapponendola alla tettonica come tecnica di costruzione “leggera” di derivazione lignea. Sebbene analiticamente utile, la definizione di Frampton non è esaustiva del più compiuto significato del termine “stereotomia”, rispetto a quanto i manuali ed i trattatisti ci hanno tramandato. Infatti, anche se la Stereotomia, intesa come disciplina storica, si rapporta principalmente ad una specifica cultura costruttiva lapidea, il suo etimo, non contenendo riferimenti al materiale da costruzione, viene usato sia nella costruzione lapidea che in quella lignea, insegnando le sue regole a costruire sistemi architettonici volti caratterizzati dalla forte complessità

⁴ SEMPER, G., *Die vier Elemente der Baukunst*, Vieweg, Brunswick 1851.

⁵ FRAMPTON, K., *Tettonica e architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, Skira, Milano 2005, p. 53.

spaziale in cui la relazione tra l'intero organismo e la sua parte è stabilita da precise conoscenze geometriche.

Dall'analisi delle prefazioni ai trattati, come si vedrà soprattutto sette-ottocenteschi, che ricostruiscono le trame dello sviluppo storico della disciplina, riscontriamo a chiare lettere la derivazione della scienza stereotomica dalle tecniche costruttive dell'arte del carpentiere.

La carpenteria è presente magistralmente nel primo trattato di Philibert de l'Orme⁶ (1510-1570) ed è preparatoria per il suo importante trattato pubblicato nel 1567⁷, in cui il terzo e quarto libro sono i primi testi storici integralmente consacrati alla stereotomia.

Tale impostazione teorica è ben esplicitata nel titolo del poderoso trattato di Amedée François Frézier (1682-1773), *La "theorie et la pratique de la coupe des pierre et du bois"*⁸, in cui è possibile leggere che la stereotomia, o arte della *coupe des pierres*, non è che un'applicazione dell'arte *du trait géométrique* dei carpentieri, modificata per la specifica natura della pietra.

La disciplina stereotomica, quindi, deriva dalla tecnica costruttiva lignea e sviluppa un sapere autonomo e ben codificato all'interno di un'unica matrice comune: la geometria proiettiva. *Charpenterie* e *Stéréotomie* sono declinazioni di un mestiere basato sull'arte del tracciato geometrico, che rappresenta l'espressione più complessa e alta dell'arte del costruire tanto in pietra quanto in legno. La stereotomia e la carpenteria hanno dato luogo ad architetture intrinsecamente differenti, tuttavia legate da una matrice comune, ispirata da regole identiche e da una geometria imprescindibile. Tirando le somme alla ricerca di una definizione per quanto sommaria, la stereotomia è quindi la disciplina che "regola" la creazione dello spazio voltato costruito con i principali materiali naturali: la pietra ed il legno.

L'evoluzione della disciplina stereotomica raggiunge il suo apice teorico nel XVIII secolo con la definizione della geometria descrittiva formulata da Gaspard Monge (1746-1818) nell'anno della Terza Repubblica Francese⁹ a cui seguirà, per svariate cause, una progressiva involuzione disciplinare, causata da un differente clima culturale e dall'adozione sempre maggiore di nuove logiche e materiali da costruzione: i secoli che seguiranno non vedranno più grandi trattati o teorici esperti, capaci di trattare in maniera organica la stereotomia come categoria essenziale dell'architettura in pietra.

Il recupero della disciplina, nata ed evolutasi per supportare le esigenze di una progettazione con una forte componente teorica ed un'esecuzione di puntuale esattezza, è oggi doveroso per più motivi:

⁶ DE L'ORME, P., *Nouvelles Inventions pour bien bastir et à petits fraiz*, Paris 1561.

⁷ *Ibidem*, *Le premier tome de l'architecture*, Morel, Paris 1567. L. III e IV.

⁸ FRÉZIER, A.F., *Eléments de stéréotomie à l'usage de l'architecture pour la coupe des pierres*, Jombert, Paris 1760.

⁹ Nome assunto dallo stato Repubblicano nato in Francia dopo la sconfitta di Sedan, nel Settembre del 1870, durante la guerra franco-prussiana.

primo fra tutti quello di dar corpo ad una cultura architettonica moderna in pietra che sembra aver perso le tracce della storia; in secondo luogo, per l'intrinseca natura didattica della disciplina che insegna a governare razionalmente la costruzione dello spazio; ed, infine, per le evidenti ragioni di sostenibilità ambientale a cui oggi non ci si può più sottrarre, avallando l'uso di materiali naturali e le tecniche di montaggio a secco.

Ipotizzare un rinnovamento della disciplina stereotomica e delle sue ragioni ontologiche, in seno al progetto d'architettura, significa tracciare una nuova strada nel campo delle attuali ricerche, racchiuse, purtroppo, in ambiti quasi esclusivamente storici; significa proporre distinguendosi come voce fuori dal coro rispetto all'attuale tendenza "mediatica" della cultura architettonica, un'alternativa operativa secondo cui l'immagine e il segno evocano in se stessi l'atto costruttivo.

2.2. Nozioni di Stereotomia "*art du trait géométrique*"

Il termine "stereotomia", o "sezione dei solidi", compare per la prima volta in un articolo di Jacques Curabelle (1599-1666) del 1644¹⁰, che ha coniato il sostantivo ricorrendo all'unione di due parole greche (*styrèos*: solido e *toum*: taglio). La stereotomia rappresentò, per Curabelle, l'astrazione colta di quella che per secoli si era tramandata come "arte del tracciato geometrico" che è sostanzialmente l'arte di disegnare, per mezzo di regole proiettive, le sagome in vera forma delle facce dei conci di un sistema voltato per consentirne il taglio. Ma è importante considerare che la trattazione del metodo e la definizione dell'*art du trait géométrique* risalgono a circa un secolo prima, ad opera di de l'Orme che, nel suo trattato¹¹, denunciò la paternità di questo nuovo metodo. È al celebre architetto francese che infatti si fa risalire l'origine della disciplina stereotomica, mentre gli studiosi ritengono che la nascita e l'origine dell'arte del *trait géométrique* sia una questione ancora aperta e che possa essere immaginata come un lento risultato teso a riunire la pratica di cantiere con gli sviluppi delle tecniche proiettive affini alla contemporanea codifica della prospettiva. Lo stesso De l'Orme dichiarò che la sua geometria derivava dalla geometria euclidea e questo, in parte, potrebbe spiegare il suo interesse a voler "normare metodicamente" secondo una logica matematico-geometrica l'*art du trait géométrique* della cultura massonica medievale. La stereotomia è presentata da de l'Orme come il più efficace mezzo per passare dal vecchio mondo gotico al mondo moderno "regolare"; modernizzare il vecchio stile gotico con quello rinascimentale ispirato dalla cultura italiana.

Allo stesso modo, la strutturazione dei trattati di stereotomia, da de l'Orme in poi, si organizza in maniera tale che al *trait géométrique* più semplice segua quello, mano a mano, più complesso. La

¹⁰ CURABELLE, J., *Examen des oeuvres du Sieur Desargues*, Blanchard, Paris 1644.

¹¹ DE L'ORME, P., *Le premier tome de l'architecture*, L. IV, p. 91. cit. «*Ho scoperto il tracciato e ho inventato il metodo nel 1536, attraverso l'aiuto della Geometria, e un gran lavoro di spirito*».

descrizione metodologica delle fasi costruttive dell'elemento architettonico, rispetta una puntuale logica consequenziale che consente allo scalpello di giungere agevolmente alla dimostrazione del processo costruttivo. Infine, la riga ed il compasso sono gli strumenti della costruzione geometrica che vengono postulati sin dall'inizio tanto negli "Elementi"¹² di Euclide (323 a.C.-286 a.C.) quanto nei trattati di stereotomia. Chiudendo il cerchio gli strumenti della "fabbricazione stereotomica", quindi, sono anche quei simboli massonici da cui principalmente deriva la conoscenza applicata di de l'Orme. La stereotomia si fonda su tre "principi-invarianti", caratterizzanti e imprescindibili, del proprio *corpus* disciplinare:

- *invariante prefigurativo*, ovvero la capacità di suddividere un sistema voltato in opportune parti (apparecchiatura);
- *invariante tecnico/geometrico*, ovvero la capacità di descrivere, attraverso la geometria, tanto i sistemi voltati quanto i suoi elementi/conci costituenti, al fine della rispettiva realizzazione (tecnica proiettiva e tecniche di taglio);
- *invariante statico*, ovvero la capacità di assicurare l'equilibrio statico del sistema architettonico composto da conci giuntati a secco (statica grafica e meccanica dei corpi rigidi).

I "tre principi invarianti" sono intrinsecamente correlati all'interno di un'opera stereotomica; pertanto, geometria, disegno e capacità di controllo tecnico del processo costruttivo rappresentano i cardini di questa scienza che acutamente Jean Marie Pérouse de Montclos (1628-1703) definiva come l'arte «di servirsi del peso stesso della pietra contro la sua gravità per farla sostenere in alto dalla stessa forza che la farebbe cadere in basso»¹³.

2.3. La tecnica Stereotomica

Un aspetto molto interessante, strettamente legato alla pratica della stereotomia e del *trait*, riguarda le modalità di taglio della pietra e la conformazione dei conci. Dall'interpretazione dei trattati di stereotomia si può comprendere quanto fosse essenziale per l'opera stereotomica la comprensione, non tanto della geometria, quanto piuttosto delle regole di statica e delle tecniche costruttive. Se i conci in pietra, come detto, devono essere giustapposti e combinati in modo da costruire un manufatto che "sembri un tutt'uno", i primi problemi che deve il costruttore risolvere riguardano i meccanismi di distribuzione dei pesi e delle forze e la scelta della forma dei conci, in modo che questi possano ben combinarsi tra di loro e sopportare indenni le pressioni dovute ai carichi e auto

¹² EUCLIDE, *Elementi*: prima rappresentazione organica di Geometria, divisa in 13 libri risalente al 300 a.C.

¹³ PEROUSE DE MONTCLOS, J.M., *L'architecture à la française, XVIème, XVIIème, XVIIIème siècles*, Picard, Paris 1872, p. 85.

generate dal peso della struttura¹⁴. In questo paragrafo si illustreranno gli strumenti e le tecniche più comuni per la tecnica stereotomica.

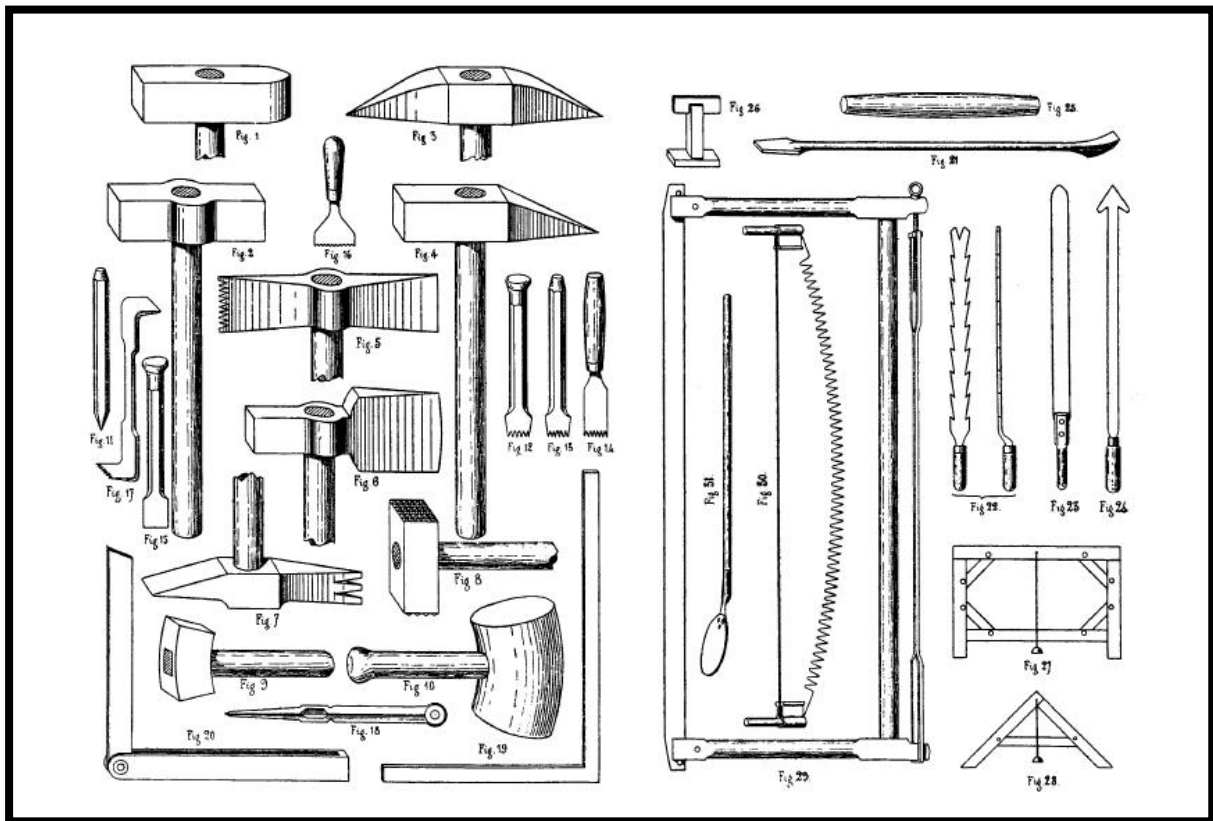


Fig. 2.1. Gli strumenti per la lavorazione dei conci. (Fonte: TREAVISAN, C.)

Durante il Medioevo di norma si procedeva *par équarrissement*¹⁵: date le misure nette del concio, si esegue la squadratura del parallelepipedo contenente il concio stesso. L'operazione prevede i seguenti passaggi:

1. L'estrazione di una pietra di forma parallelepipedica che contiene idealmente il concio.
2. L'asportazione delle parti superflue, individuate applicando le proiezioni del concio alle facce del parallelepipedo.

Questo metodo prevede dunque la suddivisione dell'arco in conci, nel caso di un *arco circolare*, i letti si dispongono lungo le bisettrici dell'angolo al centro; nel caso di un *arco ellittico*, come quello studiato nell'ambito di questa tesi¹⁶, i letti si dispongono lungo le bisettrici degli angoli formati dal segmento che congiunge il centro con i fuochi dell'ellisse. Successivamente le facce esterne di ogni singolo concio venivano "inscritte" in un rettangolo ideale, faccia del blocco grezzo in pietra, consentendo di poterne tracciare i lati per formare la *sagoma* che serviva alla scavatura (fig. 2.2).

¹⁴ TREVISAN, C., *Per la storia della stereotomia. Geometrie, metodi e costruzioni*, Gangemi, Roma 1998.

¹⁵ FRÉZIER, F., *La Theorie, Vol.1: Les trait*, pp. 408-409.

¹⁶ Vedi CAPITOLO 6: *Analisi Geometrica dell'Apparecchiatura elicoidale dei Ponti Obliqui*.

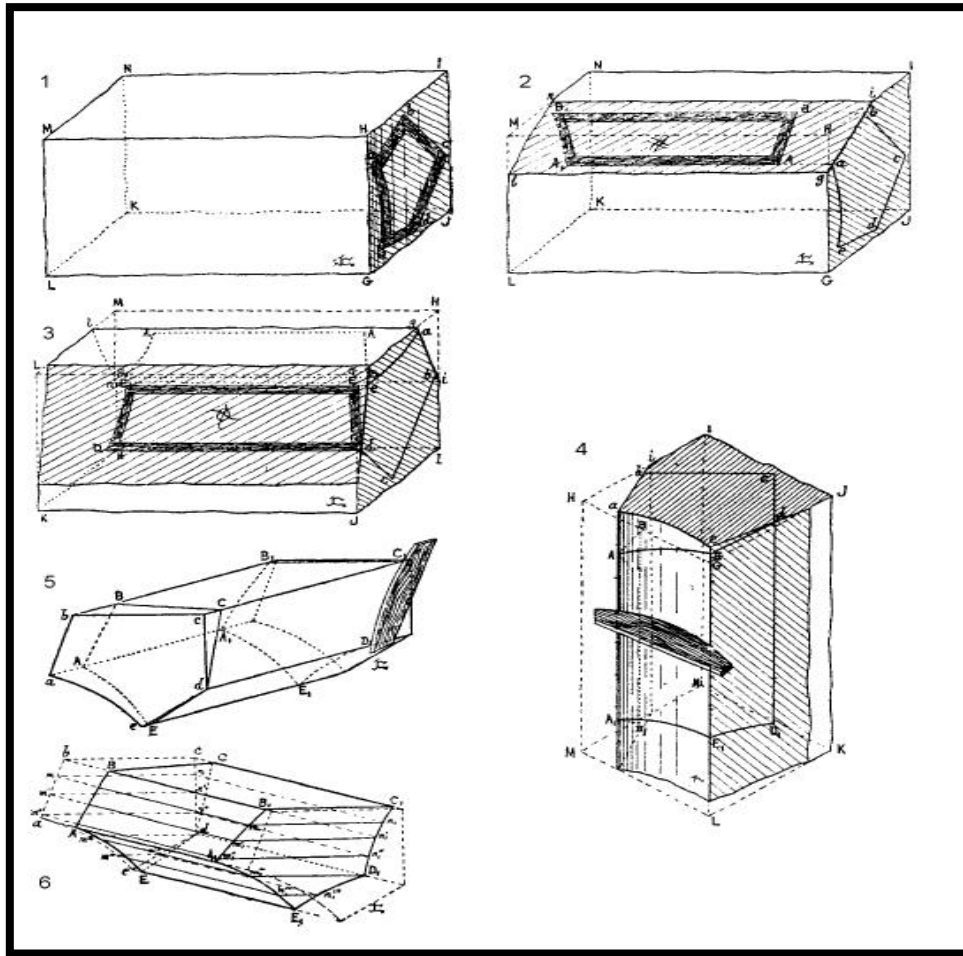


Fig. 2.2. Procedura *par équarrissement*. (Fonte: TREAVISAN, C.)

Successivamente fu introdotta la pratica di costruire pannelli che avvolgevano completamente il concio; questa procedura, detta *par panneaux o par biveaux o directe*¹⁷, prevede i seguenti passaggi:

1. La traccia per mezzo di pannelli di cartone delle facce del concio nella pietra squadrata, preferibilmente partendo da quella piana.
2. La traccia per mezzo di altri pannelli degli spigoli tra l'ultima faccia tagliata e quella adiacente.

Il metodo prevede la suddivisione dell'arco e la creazione sia della sagoma di testa dei conci, come nel caso precedente, sia delle altre facce in modo da avvolgerlo completamente. Mentre la costruzione dei pannelli è di immediata esecuzione, compresi quelli di intradosso ed estradosso (*la doelle plate*), ben più cura richiede la costrizione dei modani (*les biveau*), guide di legno che servivano a dare la giusta inclinazione ai pannelli rispetto alle facce contigue del concio adiacente (fig. 2.5); per questo motivo la serialità dei conci era un'aspetto molto importante nell'efficienza del cantiere. La predisposizione dei pannelli serviva solo alla scelta del blocco in pietra più adatto per la forma del concio da costruire, fatto che consentiva il risparmio di materia prima (fig. 2.3).

¹⁷ FRÉZIER, F., *La Theorie, Vol.1: Les Trait*, pp. 408-409.

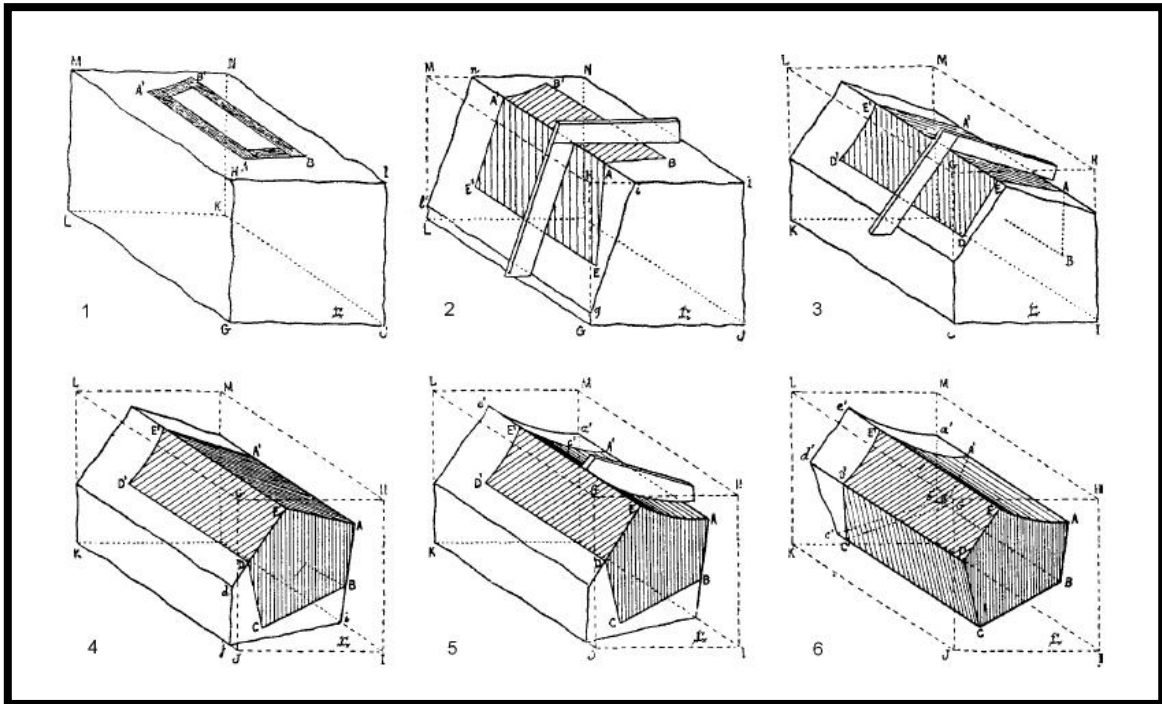


Fig. 2.3. Procedura par panneaux. (Fonte:TREAVISAN, C.)

Il metodo *par équarrissement* ha il vantaggio di richiedere pochi cartoni e non necessita della conoscenza a priori della natura delle linee di giunzione curve; d'altra parte ha il grosso svantaggio di un eccessivo spreco di materiale, soprattutto nel caso di conci fortemente curvi. Al contrario, il metodo *par panneaux* prevede un armamentario più ampio di strumenti (fig. 2.1) e richiede una grande perizia delle maestranze, ma consente di ridurre drasticamente lo spreco di materiale lapideo o ligneo e i tempi di lavorazione.

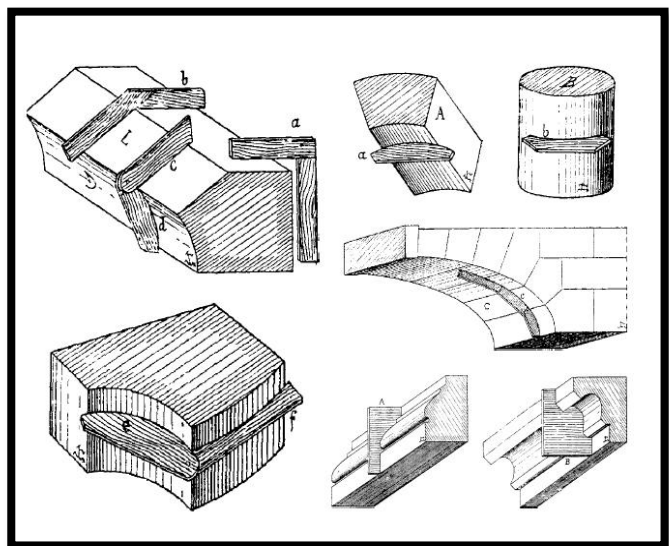
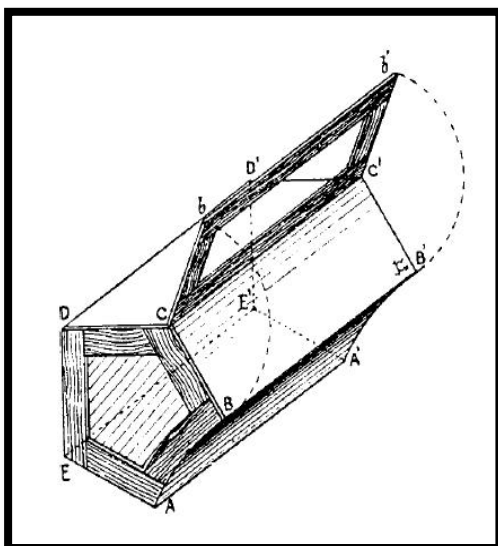


Fig. 2.4. Dettaglio del pannello (panneaux) e Fig. 2.5. Dettaglio dei modani (biveau). (Fonte:TREAVISAN, C.)

I due metodi, pur seguendo vie diverse per raggiungere il medesimo risultato, sono in realtà concettualmente molto simili tra di loro.

Il primo metodo è un diretto retaggio del gotico e prevede l'uso del grafico costruttivo in scala reale (*épure*), per questo motivo risulta poi più semplice dal punto di vista pratico. Il secondo, più raffinato, isola ogni singolo concio e gli conferisce un sistema di riferimento locale, non più legato alla fabbrica. Richiede tuttavia, più lavoro da parte del progettista (per la messa a punto dei pannelli e dei modani) ed una maggiore capacità di estrazione da parte del tagliatore di pietra, che deve prevedere mentalmente la disposizione del concio nell'opera finita. Questa procedura consente d'altra parte di poter sagomare conci dalle conformazioni molto complesse senza un aumento in termini di difficoltà tecniche e teoriche, mantenendo nel contempo il pieno controllo del concio, nella sua interezza, durante tutte le fasi costruttive¹⁸.

È importante sottolineare il ruolo del progettista nella pratica del taglio dei conci; il progetto dell'opera prevede infatti la fornitura sia degli elementi concreti (cartoni, modani e modellini costruttivi in gesso) sia l'organizzazione delle procedure costruttive che dovevano far riferimento ad una prassi ben conosciuta e consolidata. Lo scalpellino, sebbene molto abile, incontrava non poche difficoltà a passare da un metodo all'altro, allontanandosi dalla prassi ad egli più congeniale.

2.4. Dalle origini verso una Stereotomia moderna

La tipologia dello spazio voltato pseudo-stereotomico risale alle architetture lapidee del periodo romanico, epoca di transizione tra il mondo antico e quello gotico. Nell'architettura romanica è infatti possibile riconoscere tutti i proto-modelli stereotomici (volte a botte, a crociera, superfici elicoidali, ecc.) che raggiungono, durante il rinascimento, il pieno compimento teorico e pratico, attraverso l'evoluzione delle tecniche del disegno e della capacità di razionalizzare il processo costruttivo.

La relazione di continuità tra periodo romanico e moderno è garantita, almeno in Francia, dalla sopravvivenza in area provenzale sino al XIV secolo delle tradizioni costruttive mediavali. Risulta interessante rimarcare, perciò, quanto lo spazio stereotomico rinascimentale sia più affine a quello romanico che a quello gotico.

Nel trascorrere dei secoli le necessarie e inevitabili operazioni di restauro integrativo-ricostruttivo hanno implicato il perpetrarsi di una tecnica costruttiva, rinvigorita, così, da un continuo affinamento tecnico. I più grandi esponenti della stereotomia moderna francese si sono prima di tutto cimentati in opere di restauro alternando soluzioni mimetiche a ricostruzioni identiche all'originale. La Francia del XVI sec. è tesa all'affermazione del proprio potere nascente e, con la stereotomia, dichiara la ricerca di uno stile nazionale. Questa si esplicita nell'alto livello tecnico finalizzato alla realizzazione degli spazi voltati, la cui caratteristica principale è data dalla coniugazione della "continuità" plastica

¹⁸ TREVISAN, C., *Per la storia della stereotomia. Geometrie, metodi e costruzioni*, Gangemi, Roma 1998.

dei volumi, e dalla perfetta esecuzione delle curve spaziali, come “piegature” della massa muraria, nate dalle intersezioni di solidi geometrici puri. L’organismo architettonico non risulta, quindi, scomposto in costoloni, tipico della lezione gotica; la quale aveva negato il concetto di continuità della superficie e che si caratterizza per l’adozione massiccia di costoloni innervanti. La continuità nel rinascimento è garantita dal mascheramento della curva spaziale, reinterpretata con l’accostamento degli spigoli dei singoli conci, il costolone gotico, invece, cela ogni problematica di natura stereotomica, e dà luogo alla scissione tra elemento portato ed elemento portante all’interno di un sistema costruttivo omogeneo.

Il valore percettivo dello spazio stereotomico moderno è, invece, di duplice natura: l’insieme e la parte. Il primo si basa sull’assoluta plasticità organica dei volumi; il secondo sulla conoscenza della suddivisione razionale dei volumi: l’apparecchiatura. Quest’ultima risponde sia all’istanza statica che a quella decorativa della fabbrica architettonica. Nell’architettura gotica il problema del nodo di intersezione fra i volumi è rinviato a poche tipologie di elementi monolitici (i conci che compongono i costoloni) elidendo empiricamente la comprensione della loro esatta natura geometrica in corrispondenza delle linee di intersezione. Come si può dedurre, l’architettura gotica, non risponde nella propria espressività, alle esigenze proprie della stereotomia. Ad essa, però, va riconosciuto il merito di aver indagato le complesse relazioni grafiche intercorrenti tra pianta e alzato ed i ribaltamenti dei piani di costruzione, come dimostra il taccuino di Villard de Honnencourt ¹⁹ (XIII sec.).

Il più ambizioso traguardo della stereotomia moderna consiste nella codifica di un metodo sicuro che consenta la trasmissione al blocco lapideo dell’esatta configurazione geometrica del concio di un qualsivoglia sistema voltato. La relazione biunivoca senza eccezioni tra il tutto spaziale e il pezzo congruente, tra l’insieme e la parte in movimento ciclico, costituisce il *modus* innovativo dell’architettura stereotomica moderna intesa come sfida costante alla più ardita conformazione dello spazio. La grande epoca della speculazione stereotomica, coincidente con la proliferazione dei trattati di *coupe des pierres*, si sostanzia tra il XVI e il XVIII secolo, parallelamente alla produzione trattatistica italiana. Philibert de l’Orme è il primo a trarne i benefici. Iniziato ai segreti dei massoni francesi meridionali, costui ha la fortuna di studiare a fondo il Rinascimento italiano durante un viaggio studio a Roma tra il 1533 e il 1536.

Anche e soprattutto attraverso il suo contributo, la Francia diventa, quindi, l’epicentro teorico–pratico dello sviluppo della stereotomia, che pur affondando le sue radici in una speculazione d’origine italiana, vede il Bel Paese lontano da un suo approfondimento teorico e da una sua adozione pratica diffusa.

¹⁹ VILLARD DE HONNENCOURT, *Taccuino di disegni*, Paris, 1230-1236.

L'evoluzione storica della stereotomia è ben tracciata nei prologhi dei trattati del XVIII secolo. A tal proposito è bene riportare lo stato dell'arte della disciplina al tempo di Jean Baptiste De La Ruë (1685-1743). De la Ruë proviene da una famiglia di scalpellini, *tailleurs des pierres*, e la sua trattazione teorica²⁰ è più vicina alle "ricette di cantiere" che alla teorizzazione di un metodo generale per la risoluzione di tutti i problemi di stereotomia. È importante sottolineare il valore dell'opera di Girard Desargues (1591-1661), che pur osteggiata dai suoi contemporanei, non compresa dagli scalpellini, viene rivalutata molto dopo la sua morte. Con Desargues la prospettiva, ovvero le proiezioni coniche, assumono un valore completamente diverso all'interno della trattazione stereotomica. Infatti dallo *status* di "ammaliatrice dell'occhio", la visione si trasforma in strumento universale di calcolo nelle mani del progettista. La prospettiva infatti, fissando l'esatta relazione tra i corpi nello spazio, è adottata come strumento di rappresentazione tanto dai pittori quanto dagli architetti; la stereotomia, invece, indaga essenzialmente la compenetrazione e le intersezioni che i corpi possono determinare, diventando un grande potenziale costruttivo. La regola stereotomica è affine a quella prospettica, con alcune differenze: in primo luogo, le rette proiettive si "appoggiano" ad un vertice improprio del cono, quindi sono parallele e generano un cilindro; in secondo luogo, il piano intersecante è costituito dalla superficie di uno dei corpi.

Infine Amedée François Frézier (1682-1773), direttore delle fortificazioni sotto il regno di Luigi XV, pubblica nel 1737 "*La theorie et la pratique de la coupe des pierres et des bois*"²¹ in tre volumi. Nel trattato, raccoglie tutto il sapere sull'argomento, arricchendolo con un gran numero di soluzioni pratiche, sino a quel momento sconosciute, spingendo la scienza e le dimostrazioni matematiche al loro limite estremo.

I numerosi trattati sul tema stereotomico successivi all'opera di Frézier, tra cui quello²² di Adhèmar (1797-1862) da cui trae ispirazione questa tesi, lasciano chiaramente intendere una rarefazione speculativa della disciplina che costituisce, tranne qualche rara eccezione, una riproduzione delle opere precedenti ed un allontanamento progressivo dall'Architettura. La gran parte di questi trattati, usando le regole della doppia proiezione ortogonale teorizzata da Gaspard Monge (1746-1818), riportano applicazioni di geometria descrittiva ad elementi di stereotomia "classica"²³. Oggi, le tecniche di taglio finalizzate alla costruzione e messa in opera degli elementi architettonici sono ormai quasi del tutto assenti, se non per le volte più semplici.

Dal punto di vista matematico, la Stereotomia diviene un'applicazione della Geometria Descrittiva, in cui sono trattate le curve di intersezione tra piani e corpi geometrici, e le proiezioni di queste curve

²⁰ LA RUË, J. B. de, *Traité de la coupe des pierres*, P. A. Martin, Paris 1728.

²¹ FRÉZIER, A.F., *La théorie et la pratique de la coupe des pierres et des bois*, P. A. Jombert, Paris 1737-39, I vol.

²² ADHÉMAR, J.A. *Cours de mathématiques à l'usage de l'ingénieur civil*, Bachelier, Paris 1832-56, (14 volumi).

²³ MONGE, G., *Application de l'algèbre à la géométrie*, Paris 1795.

sui piani di riferimento. Quindi, la Stereotomia da originaria “arte del taglio delle pietre” si trasforma tra la fine del settecento e gli inizi dell’ottocento, in “scienza del taglio delle pietre”, ossia in una disciplina accademica fondamentale per la formazione tecnica del professionista ingegnere-architetto.

2.5. Aggiornamento della stereotomia: gli strumenti informatici.

La trattazione più importante del presente studio è il *procedimento*, volto alla scomposizione di un sistema stereotomico e allo studio delle sue singole parti e delle loro interazioni. In altre parole, si vuole comprendere la morfologia di un sistema stereotomico complesso, immaginandolo come derivato da opportune variazioni di un sistema analogo ma più semplice. Si rende necessario, a tal proposito, sottolineare che gli ambiti entro cui lo studio risulta più efficace sono rappresentati da quei sistemi stereotomici in pietra e legno caratterizzati da una complessa trama decorativa coincidente con la trama strutturale.

I saperi costruttivi che permettono siffatte costruzioni, tanto ostici quanto necessari al taglio della pietra, possono essere resi facilmente accessibili agli studiosi della disciplina grazie all’evoluzione degli attuali *software* di modellazione tridimensionale di tipo parametrico/variazionale che consentono di controllare il processo di generazione e costruzione della forma senza alcun tipo di ambiguità. Gli strumenti dell’analisi sono quindi unicamente informatici, perciò la forte affinità, concettuale e operativa, tra stereotomia e modellazione solida permette di trasformare i termini della dimostrazione da fisici a virtuali, restituendo aggiornamenti innovativi alla trattativa disciplinare.

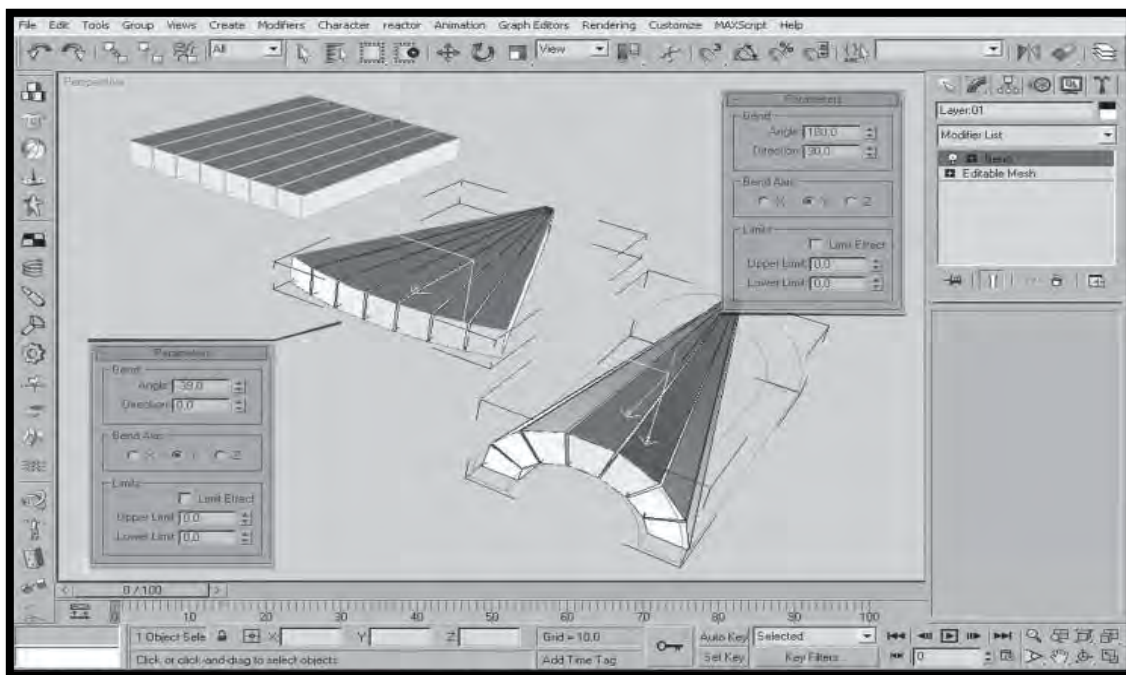


Fig. 2.6. Trasformazione di superfici. (Fonte: FALLACARA, G.)

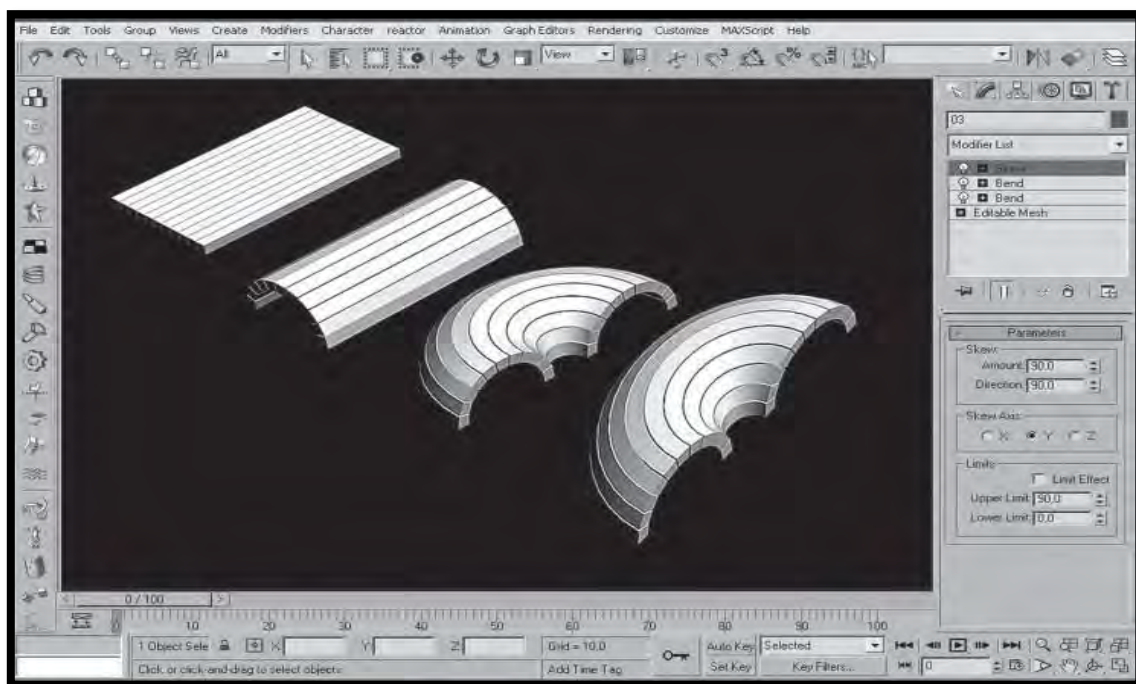


Fig. 2.7. Modellazione di superfici. (Fonte: FALLACARA, G.)

Il processo di “smaterializzazione” delle peculiari azioni di costruzione stereotomica, slegandosi dai vincoli fisico–materici, permette maggiore libertà riflessiva sulle analisi riguardanti lo spazio, la forma, la composizione volumetrica, la scomposizione in parti, l’apparecchiatura, la decorazione, la costruzione, il montaggio, la statica e la meccanica dei corpi rigidi. Bisogna, in ogni caso, tener presente che nelle operazioni di deformazione informatica, a causa dell’enorme potenzialità strumentale, è sempre presente il rischio della perdita del controllo formale che può facilmente degenerare in generiche ed incontrollate operazioni di *morphing* o spropositate metamorfosi plastiche lontane dal pensiero costruttivo della forma, di cui si sottolinea qui la fondamentale importanza²⁴. La matematica che abbandona l’astrazione dei numeri e si riappropria della figurazione geometrica diventa *computer grafica* o *infografica*.

Un *modello infografico* è una rappresentazione, formalizzata matematicamente, di un oggetto reale: è l’immagine matematica dell’oggetto reale. Tale immagine, in base alle specifiche esigenze d’analisi, può essere più o meno dettagliata e può presentare alti o bassi gradi di astrazione. Il tipo di formalizzazione matematica è la causa diretta della giusta corrispondenza formale con l’oggetto reale di cui si sta creando il modello, pur sempre inteso come un’interpretazione ideale della realtà. Esistono, quindi, per agevolare il discorso, matematiche che garantiscono una modellazione vicina alle richieste di giustezza rappresentativa di un oggetto reale e matematiche che approssimano in maniera più o meno esatta la realtà.

²⁴ FALLACARA, G., *Verso una progettazione stereotomica*, ARACNEeditrice, Roma 2007: pp 96-100.

Oggi le tecniche di modellazione fanno capo a due metodologie principali che possono essere distinte, in virtù della matematica utilizzata, in “entità discrete”, ossia modelli poligonali, ed “entità continue”, ossia modelli NURBS (*Non uniform Rational Bézier-Spline*).

Occorre ricordare che la differenza sostanziale tra un modello poligonale e un modello NURBS è che il primo restituisce una geometria discreta dell’oggetto reale, mentre il secondo una geometria continua. Al fine di ottimizzare e rendere compatibili le varie procedure di modellazione tridimensionale esiste la possibilità di convertire i modelli NURBS in modelli poligonali e viceversa.

L’ipotesi metodologica è quella di mettere a confronto due tecniche di modellazione informatica finalizzate allo studio della forma stereotomica: modellazione “diretta” e modellazione “indiretta”. Nel primo caso la forma nasce da processi consequenziali di protrusione e operazioni booleane di forme bidimensionali derivanti dai *trait géométriques*; nel secondo caso la forma nasce da processi di modellazione basati sui principi della topologia, ossia utilizzando strumenti di trasformazione e deformazione volumetriche della forma che, plasmando l’oggetto, non consentono strappi o lacerazioni dello stesso. L’idea è quella di considerare il processo di modellazione come una “scultura flessibile” dei dati digitali tridimensionali: si comincia con una forma semplice, magari un parallelepipedo o una sfera o un insieme di volumi solidi di puri, e li si modifica, per mezzo di deformazioni topologiche parametriche, in modo da raggiungere i gradi di complessità propri dell’oggetto finale. Questo sarà quindi realizzato in modo indiretto, operando semplicemente attraverso le opportune deformazioni, e non in maniera diretta attraverso la modellazione canonica che, nel caso di oggetti molto complessi, comporterebbe grosse difficoltà di modellazione tridimensionale.

La programmazione informatica ha, quindi, previsto l’introduzione di un nuovo approccio alla modellazione *infografica* basato sugli strumenti di deformazione per dare forma all’oggetto digitale in maniera indiretta. Questi strumenti, veri e propri algoritmi matematici, si adattano perfettamente alle caratteristiche della modellazione parametrica per cui, esprimendo i valori numerici dei differenti parametri, risulta facile e razionale seguire i risultati della deformazione impressa. I modificatori più importanti per la modellazione sono quelli che applicano all’oggetto, o ad una parte di esso, una deformazione semplice in base ad un asse direzionale. Tali deformazioni sono possibili grazie alla distribuzione di segmenti configuranti i poligoni, che generano la cosiddetta *tassellatura della superficie* in esame. Ogni intersezione fra i vertici si comporta come un giunto snodabile. Quindi, più segmenti abbiamo sulla superficie, più questa risulterà deformabile. Occorre notare che, contrariamente all’operazione fisica di piegatura di un qualsivoglia materiale, un’operazione di semplice o doppia *piegatura infografica* non produce lacerazioni o sovrapposizioni di materia, ma unicamente una trasformazione della geometria, che diventa l’oggetto di valutazione e di studio.

Una volta compresi intuitivamente i processi deformativi che hanno condotto alla configurazione finale di un sistema stereotomico, possiamo, a ritroso, cominciare a modellare un solido semplice ed appropriato e successivamente alterarlo o deformarlo in vari modi, assegnando anche più modificatori ad uno stesso oggetto. Tramite questo processo di propagazione delle modifiche, l'intero disegno (modello) si riconfigura assumendo nuove forme e dimensioni. Il sistema CAD, parametrico, rigenera autonomamente l'intero modello, ricostruendo la nuova geometria corrispondente a quanto richiesto dall'utente, ottenuta con processi di modellazione di gran lunga più semplici della canonica modellazione che, per casi spaziali molto complessi, può risultare improduttiva. Dal disegno sul piano si ottiene il corrispettivo nello spazio attraverso una serie di semplici e consequenziali trasformazioni formali.

2.6. Verso una progettazione stereotomica

I ragionamenti sin qui esposti e le argomentazioni addotte ci conducono alla formulazione di un nuovo e specifico ambito disciplinare, interno alla progettazione architettonica, che chiameremo *progettazione stereotomica*, ovvero, alla definizione di una specifica metodologia progettuale applicata allo studio dello spazio voltato²⁵. Parlare di progettazione stereotomica significa assumere un paradigma teorico-pratico di riferimento atto alla realizzazione di architetture concepite secondo l'utilizzo di sistemi e/o elementi architettonici voltati resistenti per forma e costituiti da conci discreti e giuntati a secco. Tale paradigma è ascrivibile alle tecniche tradizionali del costruire, specificamente in pietra e legno, dove il concetto del *legamento* delle parti costituenti la fabbrica rappresenta la cifra distintiva del carattere e della espressività architettonica. È possibile, quindi, parlare di architetture stereotomiche quando sussiste il riconoscimento di una serie di procedimenti, di natura geometrica, statica e costruttiva, che abbiamo in precedenza individuato come *principi invariati*, connessi al progetto di uno spazio voltato.

Quest'ultimo può genericamente definirsi come un ambiente delimitato da superfici piane di calpestio e di perimetrazione, e da superfici curve di copertura che rappresentano, specificamente per le architetture voltate, il vero luogo di caratterizzazione formale dello spazio. La natura geometrica della superficie curva di copertura fa riferimento a due principali luoghi geometrici: la *sfera* e il *cilindro* (superfici di rotazione e traslazione), che definiscono altrettanti tipi di spazialità: *centrale* e *longitudinale* (chiusa e aperta). Tutta l'architettura voltata, a meno di specifiche geometrie costruttive, può essere letta come una possibile composizione e articolazione di superfici sferiche e cilindriche. Lo spazio voltato ha rappresentato da sempre e, in maniera specifica nell'architettura stereotomica, il luogo ideale ove muovere la più raffinata e complessa riflessione sulla costruzione

²⁵ FALLACARA, G., *Verso una progettazione stereotomica*, ARACNEeditrice, Roma 2007: pp 140-145.

dello spazio architettonico. La qualità intrinseca dell'architettura voltata risiede nella immediata capacità, delle sue forme più semplici, di definire ambienti chiusi e misurabili che si *auto-delimitano* rispetto alla indeterminatezza dello spazio. La linea curva, propria dei sistemi archivoltati, è il luogo geometrico che, nella sua definizione, stabilisce senza ambiguità una concavità e una convessità, piegare una superficie significa renderla "accogliente" e tale da formare uno spazio interno abitabile. La progettazione stereotomica, quindi, in base a quanto esposto, è finalizzata alla celebrazione degli spazi voltati, indicando nella struttura la *conformazione del volume* e la *qualificazione delle superfici* e si concretizza attraverso l'arte del *taglio dei corpi solidi* costituenti. Questa considerazione non include specifiche sull'utilizzo dei materiali, tuttavia la pietra e il legno rappresentano i materiali della costruzione per antonomasia e, a maggior ragione oggi, possono rappresentare i materiali del futuro in quanto attingibili dalla terra, facilmente perfettibili e passibili di riutilizzo continuo, senza sprechi energetici nel loro riutilizzo.

Un possibile rinnovamento di tali principi presuppone un aggiornamento metodologico e strumentale sempre costante ed innovativo della disciplina stereotomica, atto a facilitare le operazioni sia concettuali che pratiche connesse alla gestione di problematiche diversificate: geometrico/formali, statico/meccaniche e costruttive. Abbiamo visto come, grazie alla forte affinità concettuale con la stereotomia, l'aggiornamento tecnologico per mezzo della modellazione *infografica* tridimensionale, congiunto ai principi di variazione topologica, abbia creato le strade più comode per la riflessione progettuale sullo spazio voltato.

La progettazione diviene contestualmente sia verifica delle qualità formali dello spazio, che calcolo dimensionale delle strutture, ed è agevolata dalla possibilità di realizzazione computerizzata e meccanizzata CAM degli elementi costruttivi. A tal proposito è utile rimarcare un altro concetto di alto rigore logico e perfetto per il processo di produzione industriale riferito alla *modularità programmata* dei conci, secondo cui per un qualsiasi sistema voltato è possibile ottimizzare un numero minimo di conci utile a soddisfare l'intera costruzione della volta. L'idea di *produzione seriale*, tipica dell'industria manifatturiera, si coniuga oggi con la nozione di unicità del prodotto architettonico dando vita al concetto di "unicità seriale" del manufatto. Si tratta di un ossimoro giustificabile grazie all'avvento dell'*era infografica* parametrico/variazionale coniugata all'uso delle macchine utensili a controllo numerico, per cui ogni progetto diventa unico e riproducibile in serie. Una sorta di accelerazione produttiva delle qualità del prodotto artigianale che riporta le peculiarità dell'architettura tradizionale ad un livello di migliore efficienza tecnica e prestazionale.

3. ANALISI STORICA DEI PONTI OBLIQUI

3.1. Introduzione

Nel corso del XVIII secolo, il tema dei “ponti obliqui” (*“Ponts Biais”*) chiamò in causa i più grandi maestri della geometria e della stereotomia, nonché esperti meccanici e tecnici delle costruzioni in pietra: il motivo dell’interesse per questa ricerca fu il significativo intensificarsi delle reti ferroviarie in Europa all’inizio del secolo, che spesso metteva di fronte alla necessità di dover attraversare di sbieco i corsi d’acqua e le strade rispetto alle rotaie.

Questo requisito ha costretto gli ingegneri, impegnati nella progettazione di infrastrutture ferroviarie, ad approfondire la scienza del taglio dei conci in pietra, sia a livello geometrico che a livello statico, alimentando un dibattito internazionale sulla questione dei ponti di pietra.



Fig 3.1. Le pont Trilport Marné. France 1890. (Fonte: DE PAOLA, S.).

Gli studi per la realizzazione e la progettazione di questi particolari tipi di ponte partono dalle prime formulazioni medievali di Villard de Honnecourt con lo studio dei *“Biais passés”*, passando attraverso le formulazioni importanti di de l’Orme, per quanto riguarda le origini toriche della stereotomia, e gli studi dei tanti ingegneri francesi e inglesi che si occupano delle apparecchiature ed i materiali specifici per la realizzazione dei ponti ferroviari.

I primi risultati significativi si riscontrano in Francia con il ponte su Trilport Marne, progettato da Antoine Chézy (1718-1798) tra il 1756 e il 1760 (distrutto da una mina durante la prima guerra mondiale, nel 1814), ma soprattutto il *Pont Neuf* di Parigi (il più antico ponte di pietra nella capitale francese), progettato da Jaques du Androuet Cerceau (1515-1585), Geremy Marchand (1548-1620), Louis Métezeau (1560-1615); realizzato con apparecchiatura ortogonale e inaugurato nel 1603, esso è ancora in uso per l'attraversamento della Senna in corrispondenza della punta Ovest dell' *Ile de la Cité*.

3.2. Archi e volte oblique dal XV al XIX secolo

La prima fonte, punto di partenza per molti studiosi che trattano il tema delle *volte oblique*, si trovano nel già citato "*Taccuino*" di Villard de Honnecourt: si tratta di un disegno di *arco obliquo* accompagnato da una breve didascalia, ma nonostante la mancanza di commenti e formulazioni teoriche, l'illustrazione dimostra la conoscenza di questo tipo di struttura già a partire dal Medioevo. Gli studi teorici più antichi su questo argomento possono - come abbiamo visto - essere ritrovati nei trattati di stereotomia francesi del Cinquecento e del Seicento. Tuttavia, si tratta di "passaggi" di modeste dimensioni che mostrano apparecchiature conformate da una sola fila di conci.

"*Le premier tome de l'architecture*" di Philibert de l'Orme è una pietra miliare per lo studio della stereotomia dei materiali medievali della tradizione, l'importanza del trattato, pubblicato nel 1570, è ampia: de l'Orme fu il primo a mettere per iscritto quello che fino ad allora era stato tramandato oralmente, consentendo ai posteri di riflettere sul disegno dei modelli medievali, introducendo la possibilità e la potenzialità di diverse varianti attraverso l'escogitazione e l'invenzione, che divenne evidente poi nel manierismo e nel barocco. Molte delle soluzioni presentate nel trattato di de l'Orme sono esempi di "attraversamenti" usati come elemento connettivo tra una vecchia fabbrica e una nuova costruzione. Le soluzioni proposte dal famoso autore francese diventano la regola su cui è stata costruita l'apparecchiatura ortogonale dei ponti obliqui, con riferimento al taglio della faccia dei conci per mezzo di piani ortogonali.

A seguire in "*Architectura civile recta, y obliqua*"²⁶, Juan Caramuel y Lobkowitz (1606-1682) scrive alcuni articoli sugli archi obliqui, accompagnati da disegni geometrici; in "*El Tratado de Arquitectura*"²⁷ di Alonso de Vandelvira (1544-1626), l'autore mostra, anche se non molto chiaramente, la costruzione di un arco obliquo con giunti paralleli, mediante costruzione grafica;

²⁶ CARAMUEL, L. J., *Arquitectura civil, recta y oblicua*, Vigevano 1687.

²⁷ VANDELVIRA, A., *El Tratado de Arquitectura*, Madrid 1591. (Madrid, *Biblioteca de la Escuela de Arquitectura*).

Martinez Gines de Aranda (1634-1720) autore di “*Cerramientos y trazas de montéas*”²⁸, rappresenta il punto di partenza degli studi spagnoli sul tema delle volte oblique.

Nonostante l'importanza di questi trattati nella trasmissione del sapere costruttivo e della tecnica stereotomica medievale sulle strutture oblique, essi si limitavano a semplici passaggi con piccole inclinazioni dove, il taglio dei conci seguiva la linea di un giunto parallelo alla linea di generazione del cilindro, generando angoli acuti, senza sollevare eccessive problematiche in termini di statica strutturale, essenziale per trasporre gli stessi principi ai ponti obliqui ferroviari. La discussione su questo tema nei trattati successivi, diventerà più complessa e troverà sostegno in diverse discipline ingegneristiche.

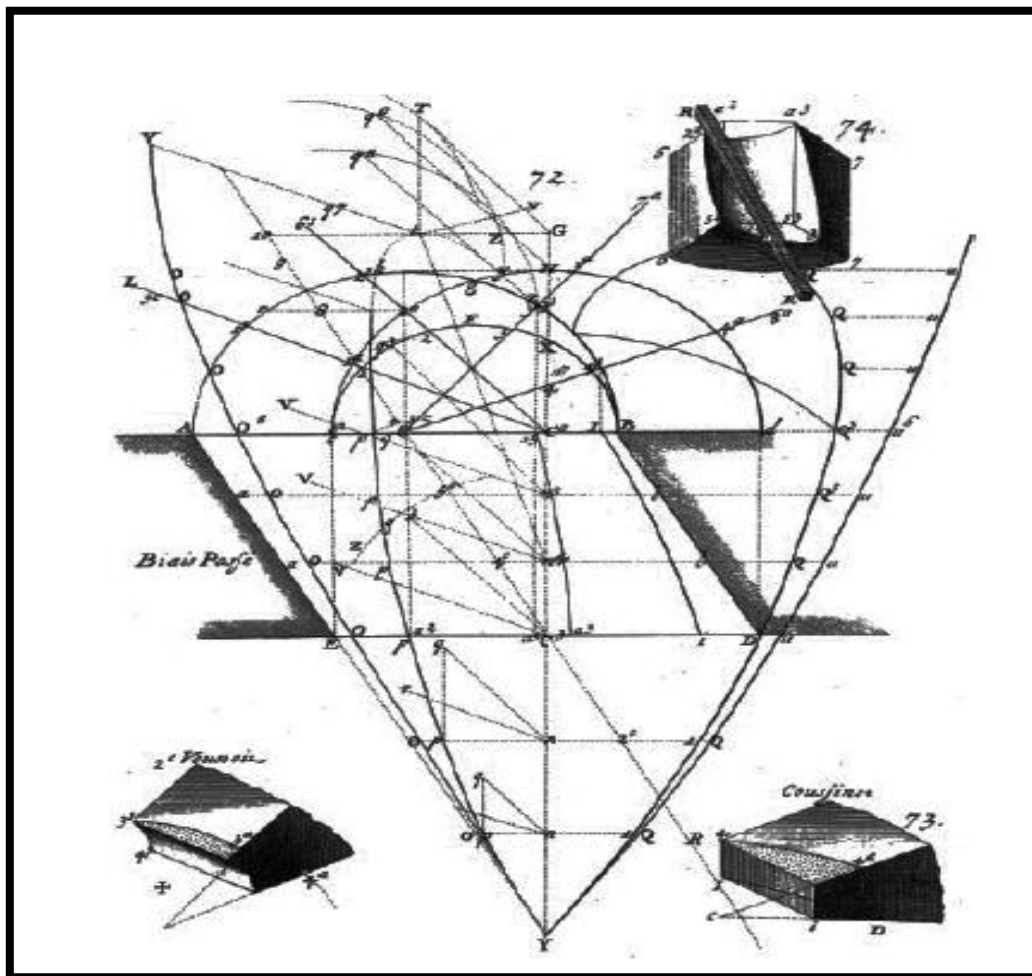


Fig 3.2. *Oblique arch trait.* (Fonte: FREZIÉR, F.).

Il “*Traité de la coupe des pierres*”²⁹ di Philippe de la Hire (1640-1718) rappresenta l'apertura della tecnica stereotomica alla meccanica applicata agli edifici, sia per quanto riguarda la geometria della *coupe des pierres* (taglio della pietra), sia per la determinazione statica delle forze in gioco, e nella

²⁸ GINES DE ARANDA, M., *Cerramientos y trazas de montéas*, Madrid 1690. (Madrid, *Biblioteca del Museo de Ingenieros del Servicio Históricos Militar*).

²⁹ LA HIRE, P. de, *Traité de la coupe des pierres*, Paris 1687. (Paris, *Bibliothèque de l'Institut*).

seconda metà del XVII secolo, da lì via ad una lunga serie di discussioni teoriche che hanno intensificato lo studio e la ricerca delle soluzioni più efficaci per gli attraversamenti obliqui. De La Hire introduce i principi statici con cui si trasmettono le forze tra i conci, la loro più efficace conformazione e le articolazioni fra di essi, il comportamento delle strutture a conci e la conseguente possibilità di rottura. Il complesso rapporto tra meccanica e stereotomia è stato più volte richiamato nel trattato di Frézier, composto da tre volumi dedicati al problema della *coupé des pierres* e un'appendice sul comportamento meccanico della volta. Dopo la lezione di Frézier la stereotomia diventa una vera e propria scienza matematica e fisica basata sulla geometria descrittiva in cui la conformazione della volta è determinata per far fronte nel modo più efficace alla linea delle pressioni generate dai carichi a cui è soggetta.

Il XVIII secolo è stato caratterizzato da un rapido e ampio sviluppo degli studi sulla meccanica applicata all'architettura, riprendendo parecchi studi del passato, posti come base per le nuove ricerche. Con l'esplosione della rivoluzione industriale che comporta l'intensificarsi delle reti di trasporto, il tema dei ponti in pietra viene nuovamente ripreso e integrato, soprattutto dalle scuole francesi e britanniche. Le nuove soluzioni prevedono anche l'utilizzo del mattone, materiale divenuto di produzione ciclica in fabbrica e quindi a basso costo, per la realizzazione dei timpani e soprattutto del paramento voltato interno. Le apparecchiature rimangono sostanzialmente uguali a quelle dei conci ma si impiegano tecniche costruttive differenti con centine adeguate ai mattoni e giunti di malta a spessore variabile.

Nel 1818, Peter Nicholson (1765-1844) tratta per primo il tema delle volte oblique con apparecchiatura elicoidale realizzate in mattoni, mentre George Watson Buck (1789-1854) perfeziona il metodo proposto dal suo predecessore, suscitando grande interesse per il problema tanto che egli viene spesso citato dai suoi contemporanei come uno dei più grandi esperti di archi e volte sbieco. Il saggio teorico-pratico sui ponti obliqui intitolato "*Popular and practical treatise on masonry and stone-cutting*"³⁰ di Buck, è stato il punto di riferimento della letteratura inglese su questo tema, destinato agli ingegneri e architetti in generale, ma soprattutto per coloro che vigilano sulle opere pubbliche. Esso è interamente dedicato alla costruzione di archi e volte con asse obliquo e fornisce le formule per determinare le dimensioni degli angoli, per lavorare i conci di testa e i conci d'imposta e per la disposizione del letto di mattoni.

Sorprendentemente Buck ha utilizzato come riferimento della discussione e delle sue lezioni un'opera storica italiana, piuttosto di prendere ispirazione dalla scuola francese: Il ponte costruito a

³⁰ BUCK, G.W., "Popular and practical treatise on masonry and stone-cutting", in *Practical and theoretical essay on oblique bridges*, Weale, London 1839.

Torino , sulla Dora Riparia³¹, da Carlo Bernardo Mosca (1792-1867), una delle poche realizzazioni italiane in grado di confrontarsi con quelle francesi.

Jean Chaix (1842-1919), direttore tecnico dell' *Ecole Centrale de Paris*, si occupa principalmente del completamento delle reti ferroviarie nelle tratte che vanno da Parigi al confine svizzero e da Tunisi al confine con l'Algeria, luoghi in cui la progettazione e la costruzione dei ponti in pietra ferroviari diviene un tema preponderante. La stereotomia viene esaltata attraverso nuove forme, ricercate tramite gli studi di geometria descrittiva e il metodo del *trait* (disegno tecnico), che consiste nello sviluppare le superfici di contatto tra i conci, i giunti, attraverso la costruzione geometrica.

Il trattato di Joseph Alphonse Adh mar (1797-1862), "*Nouvelles Etudes de coupe des pierres, Traite pratique théorique des Ponts biais*"³² descrive e sviluppa per la prima volta tutti i tipi di apparecchiature per ponti obliqui, sia in pietra monolitica che in mattoni, utilizzati nella costruzione pratica, dedicando ogni capitolo ad un metodo specifico di equipaggiamento, aggiungendo descrizioni dettagliate sulla generazione dei giunti orizzontali e trasversali, e non trascurando sia la parte statico-teorica, con considerazioni sul bilanciamento della volta attraverso l'eliminazione delle spinte a vuoto, sia la parte pratico-realizzativa, con istruzioni sul taglio e la posa dei conci. L'opera di Adh mar   minuziosa, e costituisce di fatto il punto di partenza di questa tesi; attraverso lo studio e lo sviluppo dei suoi disegni, rappresentati in tavole chiarissime e accompagnate da lucide spiegazioni e motivazioni progettuali, si sono poste le basi per la comprensione delle apparecchiature dei ponti obliqui con particolare attenzione a quella elicoidale.

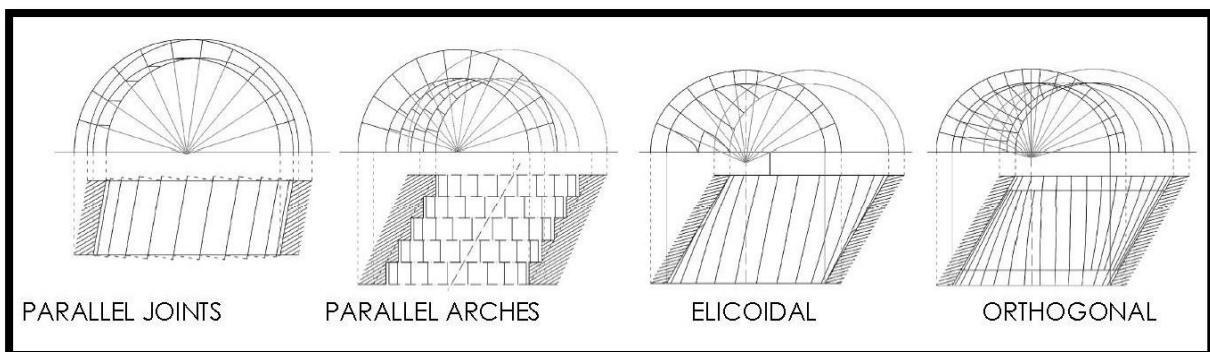


Fig 3.3. Principali tipi di apparecchiature per volte oblique, proiezioni dei giunti sul piano. (Fonte: DE PAOLA, S.).

Il matematico di Mézières , Jean Pierre Nicolas Hachette (1769-1834), discepolo di Monge , ha dedicato uno studio sulla definizione geometrica delle apparecchiature, pubblicato nel 1854, nella rivista *Annals of bridges*, con il titolo di "*Description d'un nouveau proc d  pour construire les vo tes*

³¹ Dora Riparia   un fiume del Piemonte (125 km), nasce dal colle Monginevro e confluisce nel Po nei pressi di Torino.

³² ADH MAR, J.A., *Nouvelles Etudes de coupe des pierres, Traite pratique théorique des Ponts biais*, Dalmont, Paris 1856.

*biaises*³³, Hachette individua nei sistemi utilizzati precedentemente un difetto comune e indica la strada per le soluzioni più efficaci: la complessità del lavoro, attraverso il suo nuovo metodo, chiamato cicloidale, viene meno attraverso l'utilizzo di disegni e rappresentazioni delle volte molto semplici, e perché il taglio della pietra è ricavato attraverso la produzione di facce in cuoio piatte.

Francis Bashfort (1819-1909), nei primi del '900, scrisse un trattato pratico sulla costruzione dei ponti obliqui con metodo elicoidale, "*A practical treatise on the construction of oblique bridges, with spiral and with equilibrated courses*"³⁴, suddiviso in tre capitoli: il primo, dedicato ai ponti obliqui costruiti con apparecchiatura elicoidale, il secondo sulla costruzione di ponti su corsi obliqui equilibrati e il terzo sulle costruzioni dei terminali obliqui di archi diretti.

Pur sollevando una serie di obiezioni sull'apparecchiatura elicoidale, egli mostrò come le volte oblique rappresentino il metodo migliore per il problema e pur concordando sostanzialmente con le teorie Nicholson e Buck, introduce molte varianti, soprattutto nei dettagli costruttivi, attraverso l'utilizzo di materiali diversi per le fondazioni e il rinfiacco. Inoltre Bashfort si sforza di tradurre tutte le teorie precedentemente descritte, utilizzando un linguaggio semplice per coloro che avrebbero dovuto costruire ponti obliqui nella pratica.

Contemporaneo di Buck, Jules Antoine René Maillard de la Gournerie (1814-1883) divenne uno dei protagonisti del dibattito internazionale. Insegnante di geometria descrittiva presso l'*Ecole Polytechnique e Conservatoire des Arts et Métiers* di Parigi, il suo interesse per gli aspetti meccanici dei *Ponts Biais* è riscontrabile negli studi eseguiti su un modello di un arco obliquo costruito presso il *Conservatoire des Art* nel 1874, a Parigi. In seguito nel 1851, de La Gournerie scrive un articolo³⁵ nel quale chiarisce e spiega le regole della corretta costruzione di un ponte obliquo e discute il vantaggio dell'uso di giunti ortogonali, le migliori forme degli archi, il rapporto tra il grado di inclinazione obliqua e la stabilità della struttura. Questa teoria viene poi criticata dall'ingegnere Marc Lévy (1861-1937), della stessa scuola di Maillard de la Gournerie, nell'illuminante saggio "*Note sur un système particulier de ponts biais*"³⁶ secondo il quale la vera soluzione per i ponti obliqui consista nel tagliare ortogonalmente le articolazioni, per evitare un comportamento statico poco sicuro. La diatriba coinvolge molti insegnanti di tutta Europa, impegnati con lo studio del comportamento dell'arco e delle volte, il dibattito sembra essere concluso con l'accordo in cui si stabilisce che l'apparecchiatura

³³ HACHETTE, J.P.N., Description d'un nouveau procédé pour construire les voûtes biaisées, in "*Annales des Ponts et Chaussées*", I sem., 1854, pp. 158-175.

³⁴ BASHFORT, F., *A practical treatise on the construction of oblique bridges, with spiral and with equilibrated courses*, G. Bell, London 1850.

³⁵ LA GOURNERIE, J. de, Considérations géométriques sur les arches biaisées, in "*Annales des Ponts et Chaussées*", II sem., 1851, pp. 82-115.

³⁶ LÉVY, M., Note sur un système particulier de ponts biais, in "*Annales des Ponts et Chaussées*", IV trim., 1897, pp. 5-19.

elicoidale dà più stabilità, ma quella ortogonale è più facile da costruire. Mentre gli ingegneri britannici sembrano più interessati ai problemi di natura pratica, quelli francesi avevano un approccio più speculativo, cercando di garantire una perfetta stabilità, evitando angoli acuti nei conci e mantenendo la perpendicolarità dei giunti radiali rispetto all'intradosso.

In Italia è Antonio Cantalupi (1851-1938), un Ingegnere civile del distretto Lombardo, che si occupa dell'argomento in *"La Costruzione dei Ponti e dei Viadotti"*³⁷, trattato di architettura, che partecipa alla diatriba studiando e individuando gli esemplari più antichi di ponti obliqui in pietra realizzati in Italia: il ponte *Protche* sulla Porrettana, il *Berman* a Udine, il *Pontebba* a Ospedaletto, il *Caimi* a Boffalora e il *Ribecchi* sul Lambro.

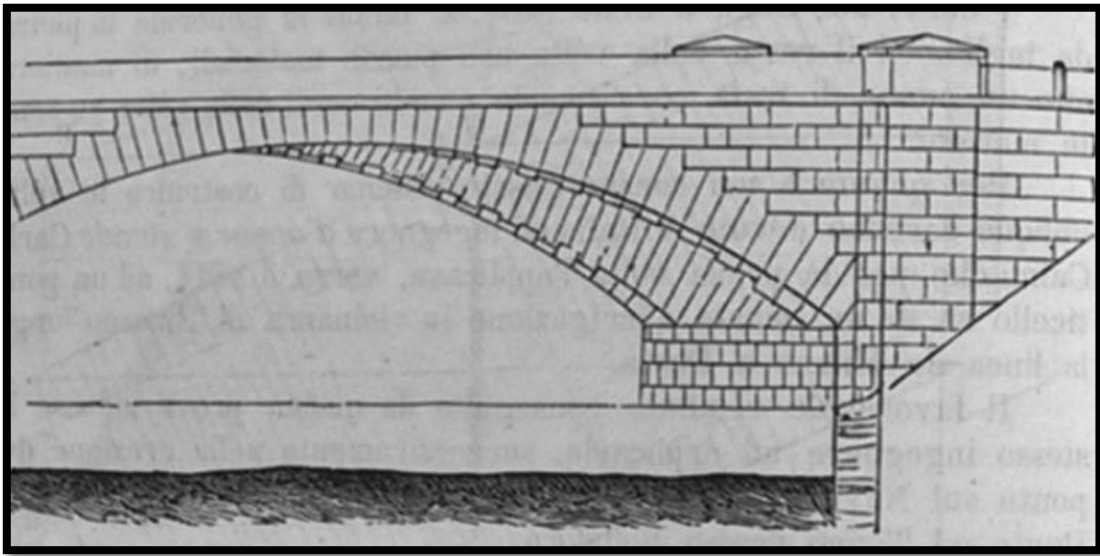


Fig. 3.4. Ponte sul Naviglio Grande. Boffalora (MI). (Fonte: CANTALUPI, A.).

L'ingegnere afferma che il primo ponte obliquo apparso in Italia è stato progettato dall'ing. Carlo Caimi (1810-1887) nel 1837 per attraversare il Naviglio Grande tra Boffalora e Magenta in provincia di Milano, in seguito distrutto a causa di un bombardamento durante la Guerra d'Indipendenza dell'Italia dall'Austria.

Mentre gli esemplari ancora in uso e degni di nota si trovano: il più famoso, a Porta Venezia a Milano sul Naviglio, l'altro sulla linea ferroviaria Milano-Treviglio sul fiume Lambro), entrambi risalenti al 1850.

In Italia è l'Università di Pavia a primeggiare nel campo ingegneristico, soprattutto per la costruzione delle prime linee ferrate nel Veneto e nella Lombardia, e l'applicazione della stereotomia nelle apparecchiature di ponti obliqui. I maggiori rappresentanti dello studio pavese sono l'ing. Antonio Bordoni (1814-1883) e ing. Francesco Colombani (1814-1883), che pubblicarono molte opere³⁸,

³⁷ CANTALUPI, A., *La costruzione dei ponti e dei viadotti: trattato di architettura pratica*, Vallardi, Milano 1884.

³⁸ COLOMBANI, F., *Sul taglio dei cunei dei ponti in sbieco*, Giusti, Milano 1838.

soprattutto teoriche, sull'utilizzo della pietra per la costruzione dei ponti ferroviari e sul taglio dei conci. Essi individuano il primo esemplare di ponte obliquo con apparecchiatura elicoidale apparso in Italia, a Torino, e progettato dall'Ing. Mosca capace di attraversare una strada con una notevole inclinazione.

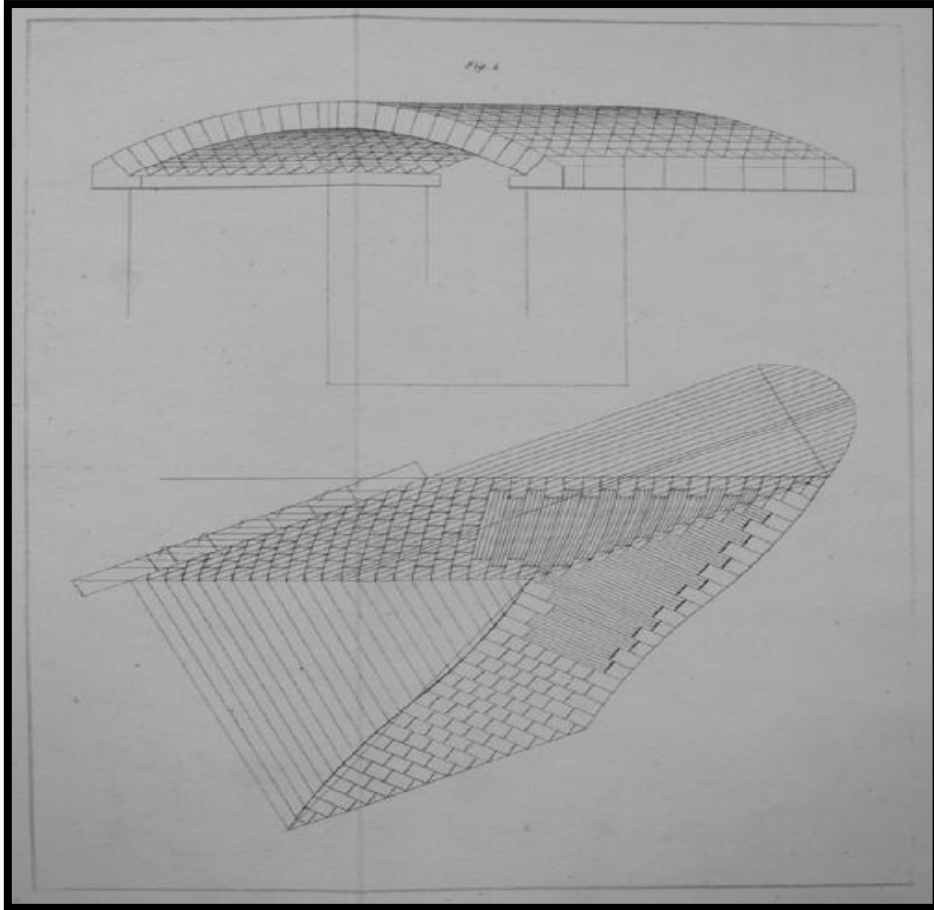


Fig. 3.5. Tavola di progetto Ing. Mosca, Torino (1883). (Fonte: CANTALUPI, A.).

La Porrettana è la linea ferroviaria italiana con la maggior concentrazione di ponti e cavalcavia a struttura obliqua, anche se parzialmente distrutti dall'esercito nazista in ritirata, durante la Seconda Guerra Mondiale, essi furono subito ricostruiti sulla stessa traccia dei precedenti, fra questi i più importanti per dimensioni sono: il Ponte in Lama di Reno e il Ponte di Calvezano e Vergato che mantengono la struttura originale in pietra con apparecchiatura ad archi successivi eccentrici, mentre le strutture che hanno mantenuto l'intradosso pressoché intatto vengono consolidati con getto di calcestruzzo non armato (fig. 3.6. e 3.7)

BORDONI, A., *Nota di stereotomia sopra i cunei dei ponti in isbieco*, Giusti, Milano 1826.

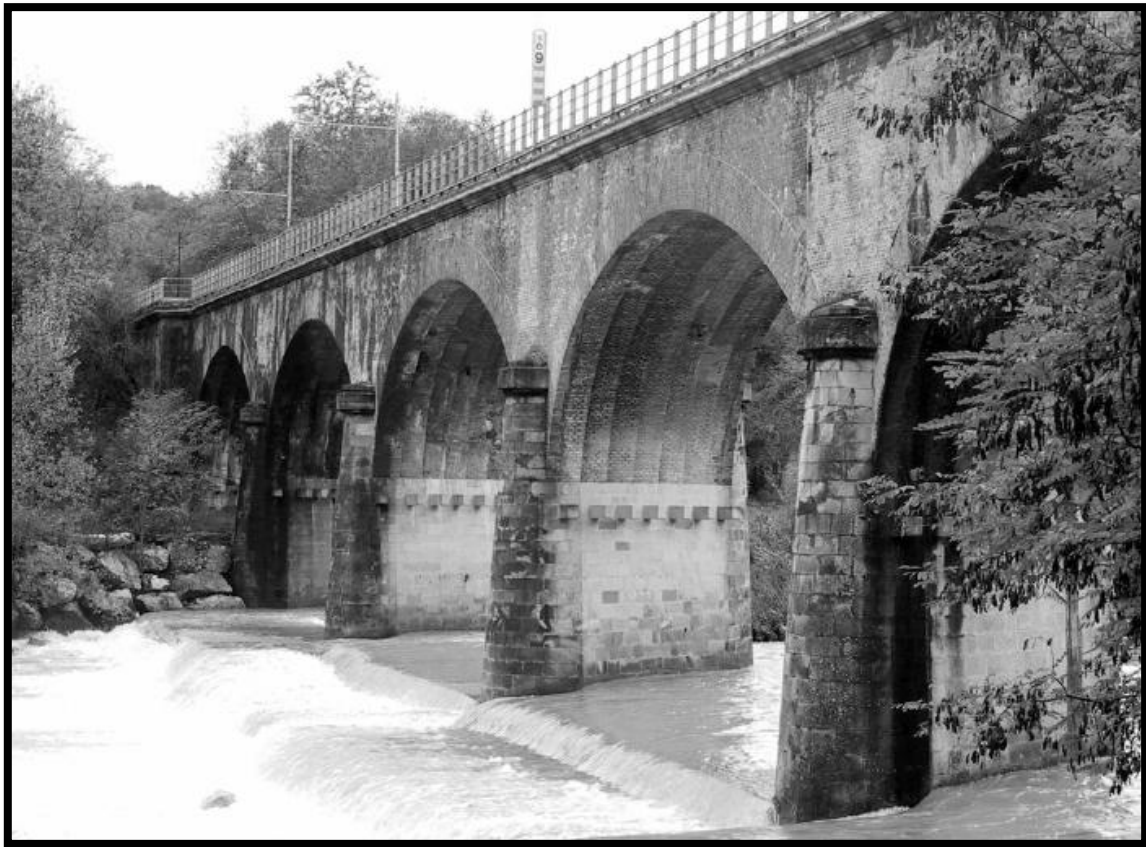


Fig. 3.6. Ponte in Lama di Reno (MI), Linea ferroviaria Porrettana. 1921. (Fonte: WWW.laporrettana.it).

Gli *“Annales des Ponts et Chaussées”*³⁹, la più antica rivista del settore che vede tutti i più illustri interpreti dell’epoca mostrare le proprie teorie, diviene il luogo dove presentare i risultati ottenuti e le regole costruttive innovative, ed in particolare, nel settore della stereotomia e della meccanica applicata agli edifici, la diatriba si presenta molto accesa e ricca di discussioni. I punti di disaccordo sono molteplici: dai dettagli costruttivi, legati alla scelta dei materiali e alle tecniche di apparecchiatura, alla forma geometrica del ponte e delle sue componenti con le articolazioni di posa, ai problemi statici, come la determinazione delle distribuzioni di tensione all’interno di archi e supporti. La scuola francese fornisce molta importanza allo studio della direzione delle spinte nel vuoto, analizzando la compressione delle pietre acute e il comportamento in chiave per evitarne l’espulsione. In ogni caso tutti gli studiosi sono d’accordo sul fatto che è necessario dare ai conci una configurazione geometrica ben precisa, partendo da regole ben chiare ed essenziali per la tenuta statica in sicurezza sotto l’azione di carichi pesanti; conservare il parallelismo di testa con l’arco anteriore della volta, la perpendicolarità tra le giunzioni longitudinali e il fronte di base e infine il parallelismo dei giunti con la direzione dei supporti.

³⁹ Primo periodico nel settore dell’ingegneria, di origine francese, prima pubblicazione nel 1831, raccoglie memorie e documenti relativi all’arte del costruire e ai servizi dell’ingegneria.



Fig. 3.7. Ponte in Lama di Reno (MI), Linea ferroviaria Porrettana. 1921. (Fonte: WWW.laporretana.it).

4. ELEMENTI COSTITUTIVI E STRUTTURALI DEI PONTI AD ARCO IN MURATURA

4.1. Generalità

I ponti in muratura moderni, soprattutto quelli sul territorio italiano, sono stati costruiti nell'arco di poco più di 100 anni, approssimativamente tra il 1840 e il 1930, periodo in cui nasce e si sviluppa la rete ferroviaria italiana. Nonostante questo tipo di costruzione sia collocata in un periodo di tempo piuttosto limitato, i ponti si presentano molto spesso con soluzioni strutturali comuni, ma con alcune scelte strutturali di dettaglio e con particolari esecutivi variabili in funzione dell'epoca di costruzione, dell'area geografica e, probabilmente, anche del progettista; essi saranno comunque classificati più avanti in base alle tipologie strutturali e le caratteristiche geometriche più ricorrenti⁴⁰. Per tali motivi in questo paragrafo ci occuperemo degli aspetti più generali legati alle strutture e alle tecniche di costruzione dei ponti in muratura.

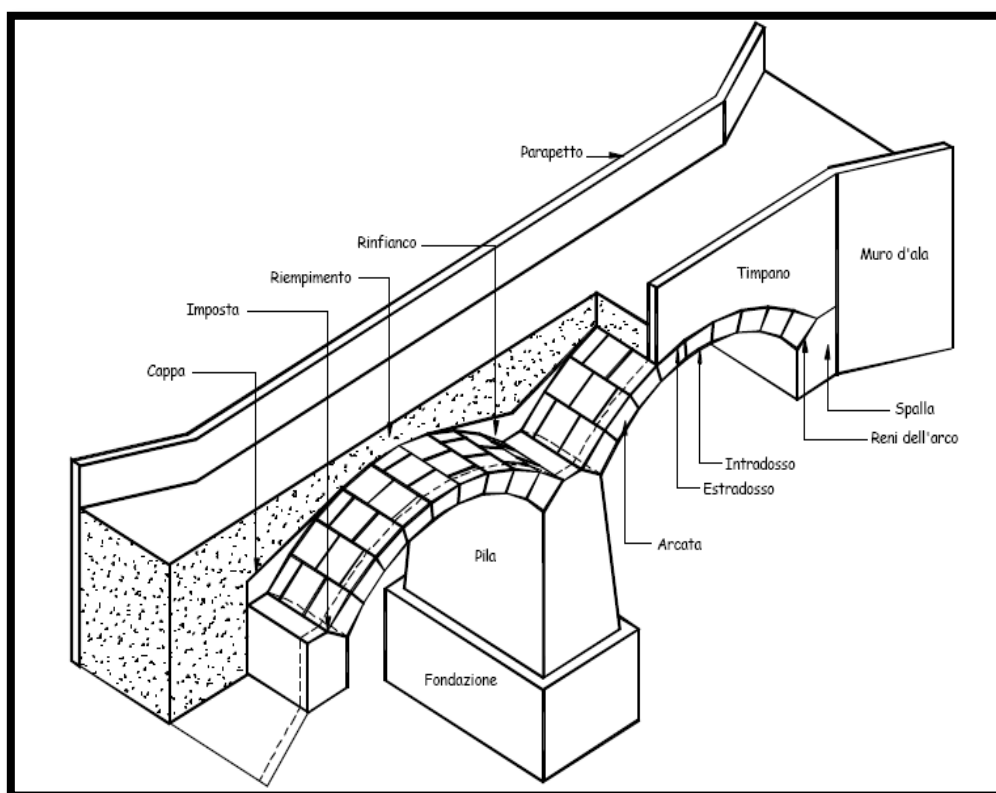


Fig. 4.1. Spaccato assometrico di un ponte in muratura. (Fonte:RABIOLI,R 1993).

⁴⁰ RABIOLI, R., Controllo di ponti ferroviari ad arco in muratura di mattoni in *Ingegneria Ferroviaria*, n°8, 1993.

Con riferimento alla figura 4.1 le parti che compongono un ponte ad arco in muratura sono:

- *Fondazioni*: il collegamento tra pile e terreno.
- *Spalle*: la struttura che sostiene l'arcata.
- *Pile*: le strutture che sostengono le arcate tra più campate continue.
- *Rinfianco, Cappa, Riempimento*: elementi che stabilizzano e livellano il piano percorribile.
- *Timpani*: parti di contenimento del riempimento la cappa e il rinfianco.
- *Arcata*: la struttura portante del piano percorribile.

4.2. Fondazioni

Nei ponti in muratura si riconoscono tre tipi di fondazione:

1. *La fondazione profonda su pali.*
2. *La fondazione superficiale o semi-profonda su pozzo.*
3. *La fondazione a platea.*

1. FONDAZIONI PROFONDA SU PALI

L'utilizzo di pali in legno nelle fondazioni è una tecnica che risale ai tempi dei Romani, il diametro utilizzato per questo tipo di pali varia tra i 20 e i 35 cm, pari alle dimensioni di un tronco d'albero facilmente trasportabile, per una lunghezza che raramente supera i 10 metri, vista la difficoltà d'infissione (fig. 4.2).

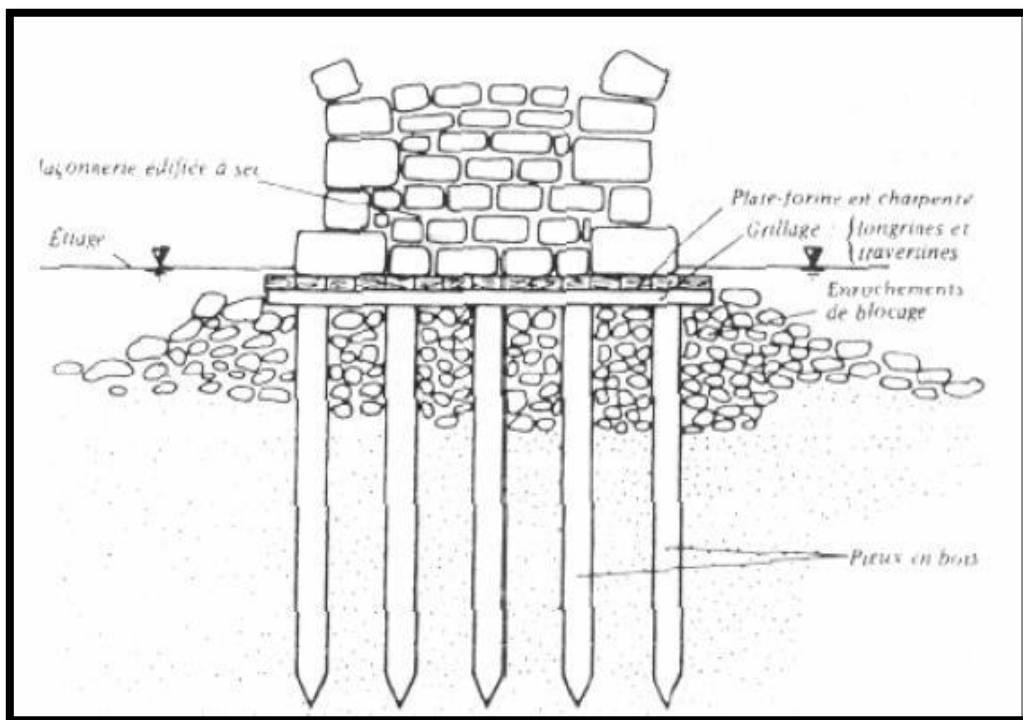


Fig. 4.2. Fondazioni su pali. (Fonte: RABOLI, R 1993).

Nelle opere più antiche, i pali sono battuti all'interno di un grigliato di travi lignee a sostegno della pila, in alcuni casi senza un plinto di collegamento intermedio. In epoca successiva i pali vengono disposti secondo maglie più regolari a distanze variabili tra 0.8 e 1.5 metri e collegati, dopo il taglio, per mezzo di un grigliato in legno destinato a ripartire il carico verticale.

Per bloccare la testa dei pali, prima di porre in opera il tavolato in legno, viene disposto un riempimento in pietra tenera e malta. Le successive tecniche e lo sviluppo dei mezzi di pompaggio hanno permesso di stabilire la base della pila ad alcuni metri sotto il livello dei fiumi, anticipando certe procedure di scavo mediante palancole. Verso la fine del XVIII secolo questa tecnica viene sostituita da quella del cassone affondato. Il cassone viene assemblato a riva, riempito nella parte inferiore con 3 o 4 corsi di muratura per formare la base dello scafo e affondato in corrispondenza della pila. La costruzione della muratura procede dentro al cassone fino al livello dell'acqua; successivamente il cassone viene smontato e riutilizzato per le altre pile.

Nel XIX secolo si sviluppano tecniche diverse che impiegano il calcestruzzo, l'ancoraggio dei pali inizia ad essere realizzato mediante un grosso blocco di calcestruzzo, consentendo l'abbandono del grigliato in travi di legno. Per evitare il dilavamento del calcestruzzo si realizza una cortina di palancole in legno a coronamento dell'area di getto.

2. FONDAZIONI SUPERFICIALI

Le Fondazioni superficiali si ritrovano solo quando il substrato roccioso è situato a breve distanza dal piano di campagna. Per le opere di maggior rilievo, la fondazione della pila è realizzata mediante un allargamento, spesso realizzato con blocchi lapidei (fig. 4.3).

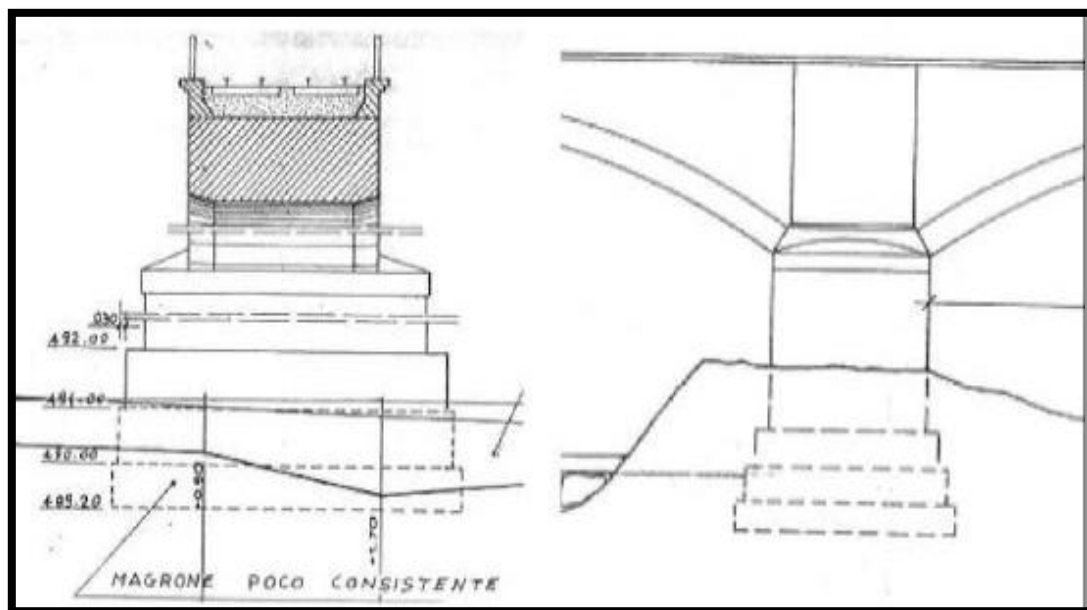


Fig.4.3. Fondazione superficiale. (Fonte:RABIOLI,R 1993).

Nei casi in cui è possibile dragare il fondo, si fa ricorso a cassoni privi di chiusura inferiore, e si getta il calcestruzzo a secco all'interno. Successivamente, la disponibilità di leganti in grado di fare presa anche sott'acqua hanno consentito di gettare il calcestruzzo direttamente in acqua. Spesso la struttura di fondazione viene fortemente ingrossata nel senso della corrente per limitare il rischio di erosione della struttura fondale.

3. FONDAZIONE A PLATEA

La fondazione a platea è costituita da un'unica struttura fondale comune a tutte le pile e che, in corrispondenza del ponte, viene a ricoprire il fondo dell'alveo fluviale. In generale questo tipo di fondazione è stato impiegato nella realizzazione di piccole opere ad un solo arco ed è stata realizzata a profondità maggiore di 1 metro al di sotto del livello di secca. Essa presenta un tallone a monte ed uno a valle ed è, in genere, circondata da una paratia di pali collegati da legname e da tavoloni disposti verticalmente (fig. 4.4).

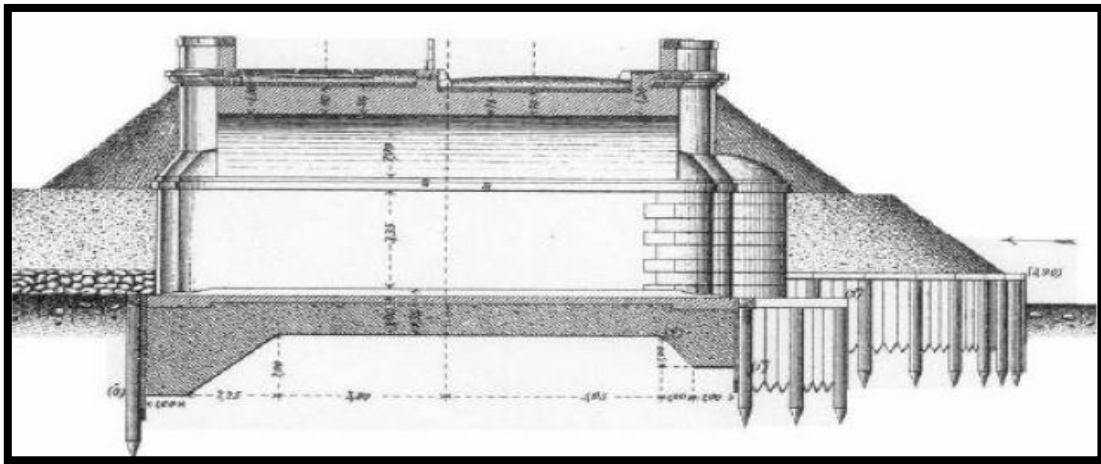


Fig. 4.4. *Fondazione a platea.* (Fonte:RABIOLI,R 1993).

4.3. Spalle

Le *spalle* dei ponti sono, in genere, massicci muri di sostegno in muratura che, oltre ad assolvere alla funzione di sostegno del terreno, forniscono appoggio alle arcate terminali. Sono strutture massicce, costituite in genere da un robusto piedritto disposto nel senso alla corrente del fiume, simile ad una pila. In alcuni casi la spalla è munita di due muri di accompagnamento.

Mentre le volte centrali di un ponte trasmettono alle pile azioni prevalentemente verticali, almeno con riferimento ai pesi propri, l'ultima arcata trasmette alla spalla anche una rilevante spinta orizzontale che deve essere sopportata adeguatamente dalla struttura. Per questo motivo le spalle sono in genere più ampie della loro parte visibile, con sezione trapezoidale o rettangolare e con muri d'irrigidimento nella direzione dell'asse longitudinale del ponte.

Uno dei dissesti possibili deriva dallo scorrimento dei giunti di malta attivato dalle forti spinte orizzontali trasmesse dall'arcata; per questo le reni degli archi non presentano giunti di malta orizzontali, ma una tessitura con giunti di malta disposti normalmente alla direzione di spinta.

Nei ponti di grande luce la spalla può raggiungere proporzioni ragguardevoli. In questi casi si ritrova sovente un vano all'interno del manufatto, coperto da una grossa volta a botte a sesto ribassato, la spinta dell'arco neutralizza in parte quella proveniente dall'arcata del ponte e funge da alleggerimento della spalla (fig. 4.5). Talvolta i vani nascosti all'interno delle spalle vengono realizzati appositamente con l'intento di alleggerire la struttura, in questi casi un arco rovescio di fondazione fa da pavimentazione.

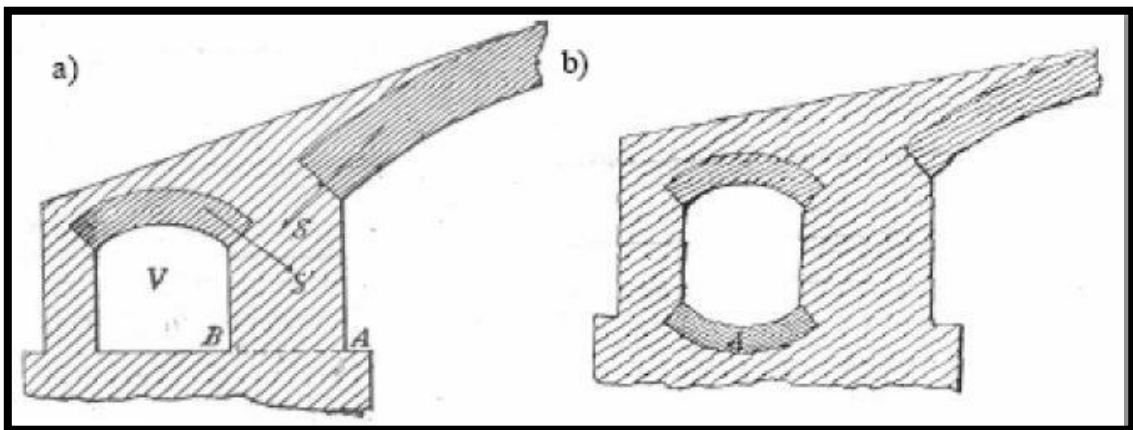


Fig. 4.5. Spalle con vani interni. (Fonte: BAGGI, G., 1926.)

Un'altra tecnica di alleggerimento delle spalle dei ponti dotati di grande luce è quella di munirle di contrafforti in direzione parallela all'asse del ponte. In alcuni casi le estremità dell'arco venivano prolungate entro le spalle e inglobate all'interno della muratura piena ovvero in altri casi lasciando dei vani in adiacenza (fig. 4.6).

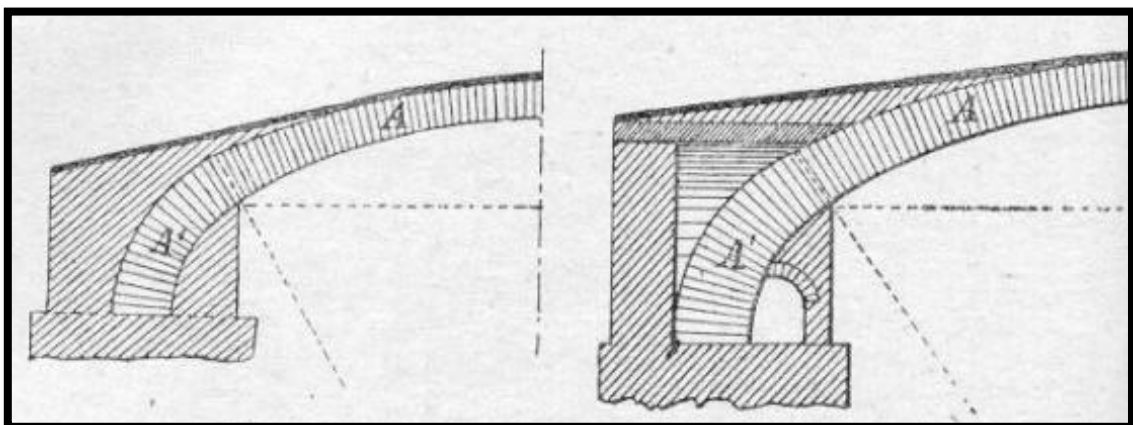


Fig. 4.6. Spalle con vani interni. (Fonte: BAGGI, G., 1926.)

Per i ponti su un alveo fluviale la necessità di deviare il flusso della piena ha condotto all'introduzione di *rostri* a monte e a valle delle spalle, con un allargamento in pianta delle stesse fino a larghezze decisamente maggiori di quella dell'arcata.

4.4. Pile

Le pile per ponti, diverse da quelle dei viadotti, presentano un'altezza moderata, minore di 12 m a partire dal piano di fondazione, hanno di solito pareti verticali e pianta rettangolare, tranne nel caso di ponti obliqui caratterizzate da pile a pianta trapezoidale. Anche per le pile, così come, e più ancora che per le spalle, si manifesta la necessità di contenere la pressione trasmessa al terreno; l'accorgimento tecnico è analogo a quanto detto nel paragrafo precedente, risolvendo il problema con l'inserimento di vani vuoti per ridurre il peso proprio della struttura. Le *pila-spalle* sono presenti nei ponti a più campate e nascono dall'esigenza di garantire la sopravvivenza almeno parziale del ponte qualora dovesse crollare un'arcata (fig. 4.7). Specie nei viadotti, il crollo di un'arcata determina l'insorgere di spinte orizzontali in sommità alle pile, spinte cui la pila non può resistere, di conseguenza si innesca un effetto domino, che si arresta solo quando una delle pile è in grado di equilibrare la spinta orizzontale dell'arcata residua. Questa pila resistente alle spinte orizzontali offre maggiore resistenza mediante un'ampliamento delle sue dimensioni e costituisce quella che viene definita, appunto, una *pila-spalla*.

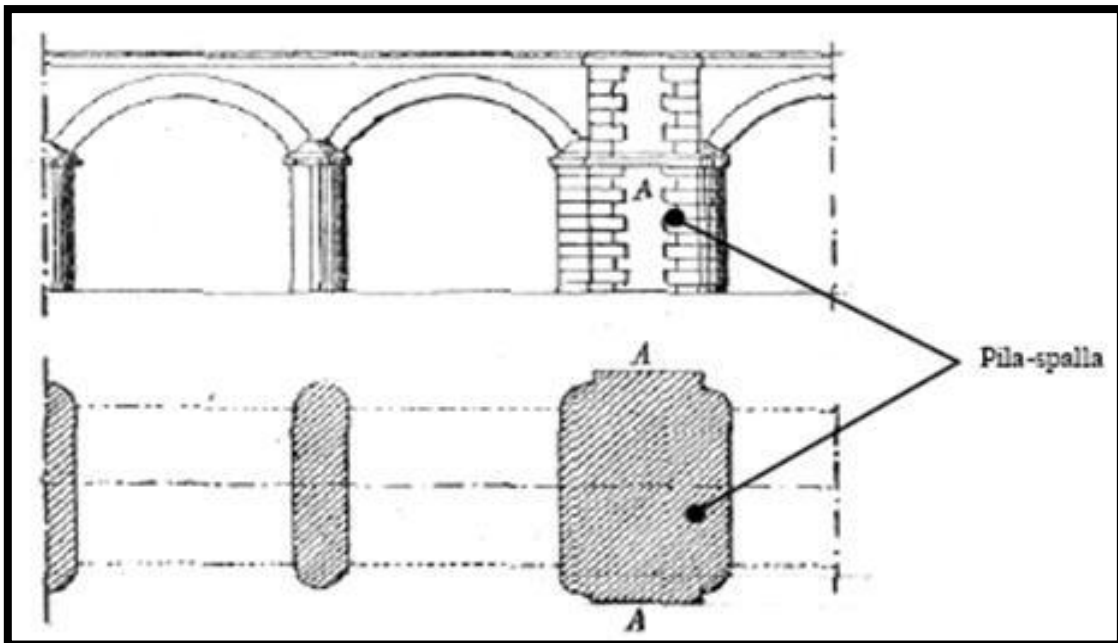


Fig. 4.7. Pila-Spalla. (Fonte: BAGGI, G., 1926.)

4.5. Rinfianco, Cappa, Riempimento

Al di sopra delle arcate, lo spazio necessario per realizzare un piano orizzontale di calpestio per il passaggio dei veicoli viene colmato con due distinti materiali: in prossimità della volta, e con spessore maggiore al di sopra delle imposte e sulle pile, viene disposto il *rinfianco*; al di sopra di questo viene collocato il *riempimento*, costituito da materiale sciolto o conglomerato poverissimo che porta il livello complessivo della struttura al piano viario.

Tra *rinfianco* e *riempimento* si ritrova la *cappa* che assolve la funzione d'impermeabilizzare il ponte.

Il *rinfianco* è costituito, in genere, da un conglomerato con discrete caratteristiche meccaniche, inferiori rispetto a quelle della muratura delle arcate, e di peso maggiore rispetto a quello della volta.

Esso assolve due funzioni:

- *Di Zavorra*: cioè stabilizza l'arco, deviando la spinta alle imposte verso la direzione verticale;
- *Di Ostacolo al cinematismo*: opponendosi alla formazione del meccanismo di collasso dell'arco⁴¹.

La *cappa* è formata da uno strato di materiale impermeabile posto a protezione della muratura e dei rinfianchi, in corrispondenza dei piedritti essa crea una canaletta di raccolta, raccordandosi per mezzo di superfici cilindriche alle diverse pendenze dei rinfianchi; la canaletta è riempita con materiale drenante (pietrisco) e da essa si dipartono, normalmente all'intradosso dell'arco, i pluviali di smaltimento delle acque. Essa è costituita da 3-4 cm di malta idraulica o cementizia (con molto legante, 350 kg/m³) preparata con sabbia grossa e ricoperta da 1,5 cm di asfalto bituminoso.

Per evitare le infiltrazioni lungo i muri andatori, o timpani, la cappa risale, con spessore ridotto, fino sotto al cordolo di coronamento. Nei ponti ferroviari il problema dell'impermeabilizzazione è particolarmente sentito, dato lo scarso impedimento all'acqua che oppongono la massicciata ed il riempimento.

Il *riempimento* è posto al di sopra della cappa ed è contenuto lateralmente dai timpani, poiché esso deve essere abbastanza leggero, permeabile all'acqua senza originare rigonfiamenti o disgregazioni, è in genere costituito da materiale sciolto, nei ponti ferroviari spesso si tratta di ghiaia o smarrino (materiale di risulta prodotto dagli scavi per la gallerie). In genere lo spessore del riempimento in corrispondenza della chiave dell'arcata è pari allo spessore della stessa.

4.6. Timpani

I *muri andatori*, o *timpani*, hanno il compito di contenere il riempimento che insiste sulla volta e sui rinfianchi, ovvero di assorbire le spinte orizzontali delle voltine di alleggerimento longitudinali. Per

⁴¹ Vedi CAPITOLO 8, par. 8.7: *Verifiche sismiche*.

evitare un sovraccarico puntale alle estremità della volta, innescato dal peso dei timpani, questi ultimi sono, in genere, costituiti con murature più leggere di quelle dell'arcata e del rinfianco.

4.7. Muri d'ala

I *muri d'ala* (o di *risvolto*), sono collocati sui lati della spalla ed hanno la funzione di contenimento del terreno nei punti di accesso al ponte; quando disposti in direzione parallela all'asse del ponte, essi fungono da contrafforti d'irrigidimento della spalla. Al loro posto si possono ritrovare i muri d'ala, disposti in prosecuzione della spalla e generalmente con svasatura di $60^{\circ}\div 80^{\circ}$ rispetto all'asse del ponte. Essi si abbassano seguendo la scarpa del terrapieno fino ad un'altezza sulla fondazione di 1-2 metri.

4.8. Archivolto

L'*arcata* è un elemento costruttivo a profilo curvilineo adottato per creare un vano e in grado di sostenere i carichi della struttura sovrastante con sole sollecitazioni a compressione. Nei ponti l'arcata è sempre costituita da una volta a botte la cui superficie di intradosso è caratterizzata dall'arco che la genera.

Nell'arco si possono distinguere le seguenti parti (fig. 4.8):

- *Intradosso e estradosso*: rispettivamente le superfici inferiore e superiore dell'arco.
- *Piano di fronte*: le superfici frontali dell'arco.
- *Chiave*: il punto più in alto della curva di intradosso.
- *Imposte*: le giunture di appoggio dell'arco sui piedritti.
- *Corda o luce*: la distanza tra i due piedritti di sostegno dell'arco.
- *Freccia o monta*: distanza tra il punto in chiave e la corda.
- *Reni*: porzione dell'arco dell'apertura di circa 30° dalle imposte, piano di rottura nel quale più facilmente si rompe una volta.

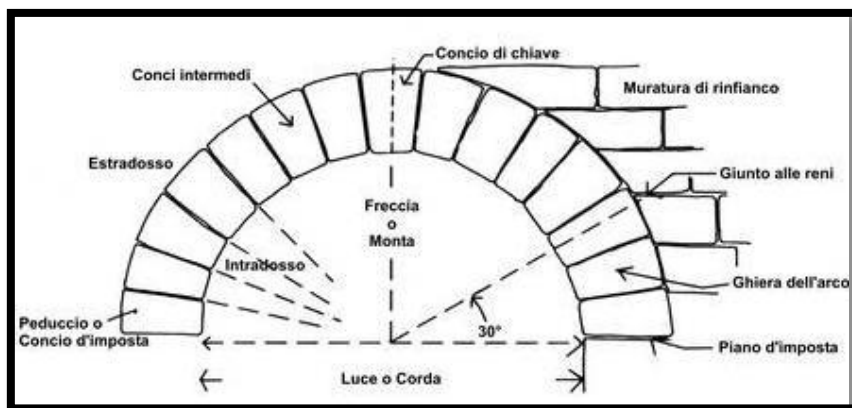


Fig. 4.8. Schema strutturale dell'arco. (Fonte: BAGGI, G., 1926.)

L'ampiezza della curva individua diverse tipologie di arco distinte dal rapporto freccia su luce:

- *Arco a tutto sesto (semicircolare):* $0.4 < f/l < 0.5$
- *Arco ribassato (circolare, policentrico, semiellittico):* $0.1 < f/l < 0.4$
- *Arco acuto o ogivale (tipologia medievale):* $f/l > 0.5$

Poiché le strutture ad arco resistono essenzialmente a causa della forma, l'arco inteso come struttura "funziona" solo quando è stato posto in opera l'ultimo suo concio; per questo motivo la sua costruzione viene eseguita su una *armatura* di sostegno provvisoria, generalmente in legname di essenza forte, costituita da una *centina* (reticolato ligneo) su cui viene appoggiato un *manto* per creare una base d'appoggio continua. L'armatura è provvista di *apparecchi per il disarmo*: cunei posizionati tra appoggio e centina la cui rimozione, completata l'opera, consente il graduale smontaggio dell'armatura.

I materiali comunemente impiegati sono:

1. *Pietra da taglio*
2. *Pietrame in conci*
3. *Mattoni*
4. *Calcestruzzo.*

Per motivi economici e decorativi l'uso della pietra da taglio è stato spesso limitato all'arco frontale e ai conci d'imposta, mentre la rimanente parte della struttura è stata molto spesso realizzata in laterizio. La pietra da taglio è stata impiegata per tutta la volta solo quando veniva richiesta alla struttura una capacità portante particolarmente elevata oppure quando l'opera aveva caratteristiche monumentali. Poiché la resistenza delle arcate in muratura di mattoni, di adeguato spessore, è sufficiente ai carichi ferroviari, gli esempi di muratura di pietra per l'arcata sono estremamente rari. Il concio di pietra è ricavato invece da pietre tenere, preparate a forma di cuneo o parallelepipedo, poste in opera con malta. Tuttavia il materiale di gran lunga più usato per le volte in muratura è il mattone di laterizio per la leggerezza e la facilità di posa in opera, nonché per la sua economicità. Impiegando laterizi e malte a lenta presa si possono raggiungere resistenze pari a quelle delle volte in pietra.

La necessità di trasferire rilevanti azioni verticali ed orizzontali alle *reni* impone non solo un dimensionamento adeguato delle spalle e delle pile su cui s'impone l'archivolto, ma anche una specifica tessitura (o *apparecchiatura*) della muratura della volta in cui i conci devono presentare angoli retti e i giunti si devono intersecare perpendicolarmente. In una volta a pianta rettangolare, i conci vengono in genere disposti secondo la *tessitura retta* o *tessitura ordinaria*, ovvero con file

parallele alle generatrici della superficie⁴², facendo in modo che in chiave si trovi sempre un concio e non un giunto. Ogni fila viene disposta sfalsando i giunti rispetto a quella precedente, evitando di creare superfici di rottura preferenziali.

Allo scopo di ridurre il rischio di scorrimenti, il giunto tra due file deve essere il più possibile perpendicolare alla curva delle pressioni, poiché questa segue approssimativamente l'andamento della generatrice dell'intradosso, i giunti devono essere perpendicolari alle direttrici. Se i conci sono in pietra, i giunti devono essere paralleli alla giacitura naturale della pietra nel banco di roccia originario, in modo da trasmettere lo sforzo assiale normalmente alle stratificazioni della roccia, evitando la delaminazione del concio.

Il numero dei filari e la lunghezza dei conci che compongono le volte dipendono dalla natura e dalle dimensioni delle pietre a disposizione del costruttore; in quanto al numero, esso è dispari per avere il concio in chiave in posizione centrale. Nelle volte in pietra di taglio lo spessore dei diversi filari misurato all'intradosso, è generalmente costante; in caso contrario risulta comunque simmetrico, nei diversi filari, rispetto alla mezzeria dell'arcata.

Le fasi esecutive della realizzazione della muratura della volta seguono due diverse tecnologie: secondo il *metodo ordinario* ciascun filare viene completato prima d'iniziare il successivo, realizzando giunti estesi su tutto lo spessore dell'arco, con l'inconveniente che lo spessore del giunto di malta non sia costante così da raggiungere dimensioni eccessive e conferire alla volta una deformabilità non omogenea. Per altro, questo metodo costruttivo impone l'uso di robuste centine, poiché l'arco viene realizzato in tutto il suo spessore per ogni concio. Con il *metodo delle zone concentriche* la volta viene realizzata a strati sovrapposti, il primo strato costituisce una parte della struttura ma può essere già impiegato come supporto al secondo strato, e così via per quelli successivi. In questo modo la centina deve sostenere solo il primo strato di arcata, ma i vari anelli non hanno un comportamento omogeneo in quanto quello inferiore, sostenendo il peso degli strati superiori, risulta più sollecitato degli altri.

⁴² Si definisce "cilindro" la superficie che si ottiene proiettando tutti i punti di una curva, detta *direttrice* da un punto improprio, non appartenente al piano della direttrice, detto vertice. Le proiezioni di questi punti vengono dette *generatrici*. cfr. GIORDANO, A., *Cupole Volte e altre Superfici: La genesi e La forma*, Utet, Torino 1999.

4.9. Volte dei ponti obliqui

L'apparecchiatura dei conci è molto più complessa nel caso di una volta obliqua, ovvero con pianta a parallelogramma, necessaria quando il ponte interseca un corso d'acqua o una via di comunicazione con un angolo diverso da quello retto. In questo caso la tessitura retta porterebbe ad avere due porzioni di volta appoggiate su una sola imposta come le porzioni grigie ABC e $A'B'C'$ (fig. 4.9).

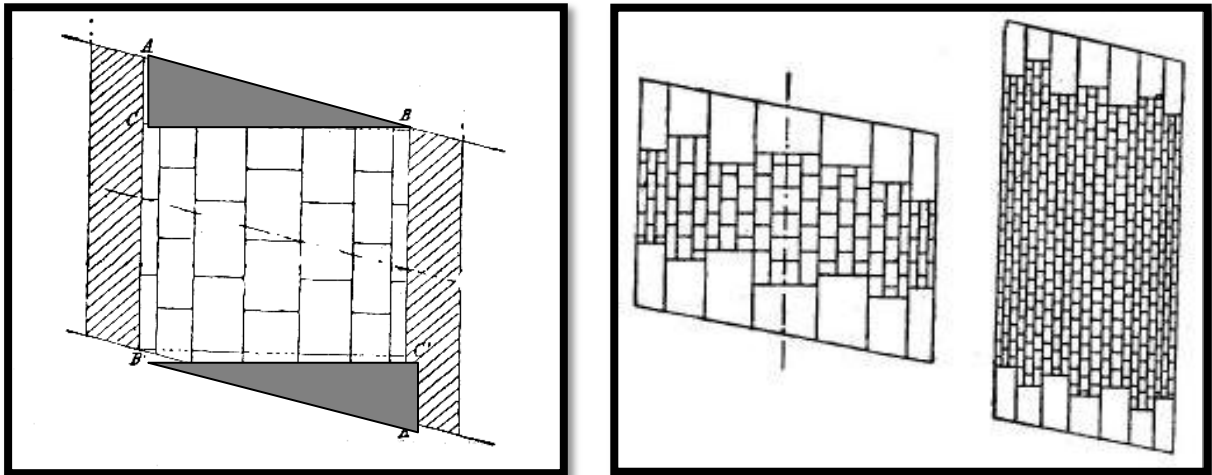


Fig. 4.9. Apparecchiatura retta su volta obliqua. e Fig. 4.10. Apparecchiature rette su volte oblique con piccole luci.
(Fonte: BAGGI, G., 1926.)

Se l'obliquità è scarsa oppure la volta è lunga e di piccola luce, l'apparecchio retto viene utilizzato per la parte interna della volta, mentre per le corone frontali vengono utilizzati speciali conci a spessore variabile (fig. 4.10).

Quando il disassamento tra asse della valle ed asse del piano viario è rilevante non è possibile ricorrere a questi accorgimenti ma è necessario sostituire l'apparecchio ordinario con un altro tipo di tessitura che trasferisca sugli appoggi le spinte esercitate dai corsi trasversali della volta. La soluzione più efficace e vantaggiosa per ovviare a questo problema è quella approfondita nell'ambito di questa tesi di laurea: l'apparecchiatura elicoidale o all'inglese. Nella apparecchiatura elicoidale i conci sono tutti uguali e con angoli diedri prossimi a 90° , ad eccezione di quelli che formano le due corone frontali. I giunti sono disposti secondo due superfici elicoidali, perpendicolari tra loro e perpendicolari rispetto alla superficie d'intradosso; il giunto all'imposta è inclinato sull'orizzontale, a differenza della volta retta, di un angolo che è funzione dell'obliquità della volta.

5. GLI STUDI DI JOSEPH ALPHONS ADHÉMAR

5.1. Biografia e Bibliografia

Joseph Alphonse Adhémar (1797–1862) fu un matematico e ingegnere parigino, professore presso *l'Ecole Centrale de Paris* di Chaix, fecondo autore di testi d'insegnamento e divulgazione delle scienze di grande successo, è ricordato come l'autore del primo progetto ferroviario per la circonvallazione di Parigi, concepita come eventuale strumento di difesa militare. Il suo più importante lavoro scientifico, che lo porta alla ribalta nel panorama internazionale è intitolato *Cours de mathématiques à l'image de l'ingénieur civil*⁴³, suddiviso in volumi, in cui l'autore sente l'esigenza di teorizzare i problemi pratici e costruttivi attraverso una produzione scientifica e trattatistica la cui impostazione ha seguito un percorso teso a delineare lo stretto rapporto tra il *sapere* ed il *saper fare*, non a caso, il sottotitolo dell'opera è *Applications de Géométrie descriptive*.

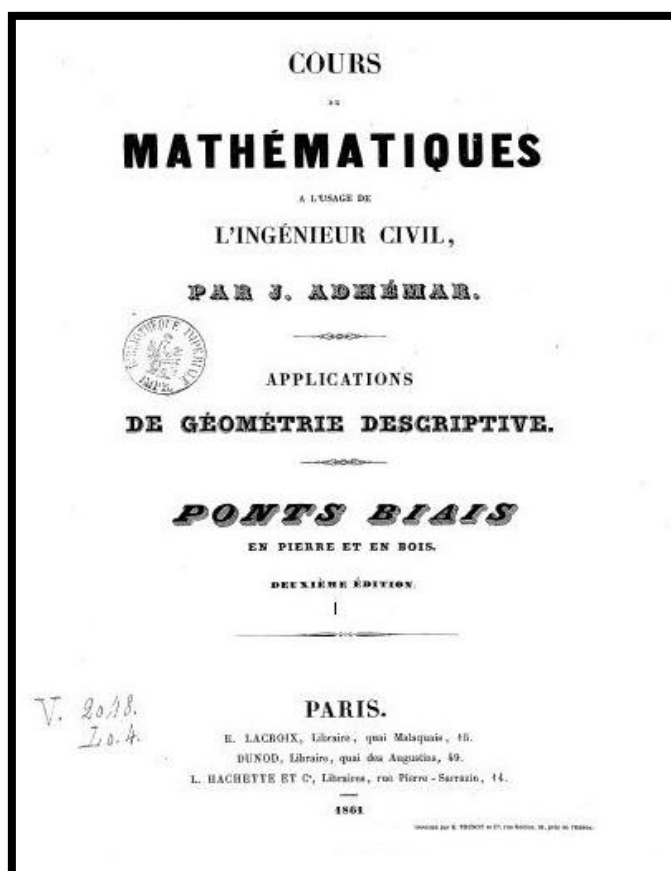


Fig. 5.1. Copertina del trattato analizzato, J.A. Adhémar. (1861).

⁴³ Vedi NOTA 2

In queste applicazioni l'autore affronta in maniera articolata e sistematica, dal punto di vista teorico e pratico, la prospettiva, le ombre, il taglio delle pietre, con approfondimenti di carpenteria, l'approccio metodologico, come chiaramente enfatizzato nel titolo generale, è di tipo matematico. Il discorso si dispiega legando i fondamenti teorici alle applicazioni ricorrenti nelle competenze dell'ingegnere che deve utilizzare il disegno per esplorare, controllare e verificare concretamente. In particolare, le tavole relative al volume intitolato *Traité de la coupe des pierre*, che sono state analizzate nell'ambito di questa tesi, dispiegano un discorso grafico-descrittivo sulla genesi geometrica dei singoli elementi che compongono una partizione architettonica in pietra, evidenziando la giacitura dei piani che li definiscono, necessaria alla configurazione oggettiva degli stessi. Largo spazio viene dato alla stereotomia la cui *tecnica aedificandi*, nota come una pratica di cantiere utile alla costruzione, crea una forma dell'architettura ontologicamente aggettivata, in quanto è al tempo stesso struttura fondamentale e sostanza; essa offre cioè risposte geometriche tese a garantire la continuità plastica dei volumi che costruiscono lo spazio e, nel progettare la conformazione dello stesso, si fa pensiero costruttivo della forma⁴⁴.

Successivamente gli orizzonti di Adhémar si allargarono andando a toccare svariati campi scientifici. Sono degni di nota gli studi astrologici sulle orbite ellittiche dei pianeti attorno al sole, trascritti nella sua famosa opera *Les Révolutions de la mer*⁴⁵, nella quale formula un teoria per il calcolo degli spessori dei ghiacciai perenni dei poli connotandosi come il primo studioso a proporre una teoria plausibile secondo cui gli eventi astronomici catastrofici abbiano potuto generare le *ere glaciali* sulla Terra.

Le sue opere più importanti e popolari, molte della quali sono veri e propri trattati sono:

- *Cours de mathématiques à l'usage de l'ingénieur civil*, (Paris 1832-56, 14 volumi);
- *Révolutions de la mer. Déluges périodiques*, (Paris 1852, 5 volumi);
- *Traité de géometrie descriptive*⁴⁶, (Paris 1834, 7 volumi);
- *Traité de perspective linéaire*⁴⁷, (Paris 1838, 9 volumi);
- *Traité des ombres*⁴⁸, (Paris 1852).

5.2. Lo studio sui ponti obliqui

“Dans la construction des chemins de fer, la nécessité de s’assujettir à certaines pentes ou corbes determines, conduit souvent à traverse obliquement des routes ou des canaux, don’t il est presque

⁴⁴ Vedi NOTA 3

⁴⁵ ADHÉMAR, J. A., *Les Révolutions de la mer*, Bachelier, Paris 1852.

⁴⁶ ADHÉMAR, J. A., *Traité de géometrie descriptive*, Dalmont, Paris 1834.

⁴⁷ ADHÉMAR, J. A., *Traité de perspective linéaire*, Dalmont, Paris 1838.

⁴⁸ ADHÉMAR, J. A., *Traité des ombres*, A. Colin, Paris 1852.

tiujours impossible de changer la direction primitive, et les point qu'il faut construire, dans ce cas, ont recu la nom de pont biais."⁴⁹

Con questa definizione Adhèmar apre il Capitolo III, dedicato ai ponti obliqui, del Libro VII del trattato di geometria descrittiva *Traité de la coupe des pierres*, pubblicato nel 1853 a Parigi, dove affronta in modo diretto una ovvia difficoltà che si affronta durante la realizzazione di una linea ferrata: L'attraversamento obliquo di strade o corsi d'acqua.

In questo trattato l'autore affronta molti problemi di geometria descrittiva partendo dallo studio e dallo sviluppo delle superfici rigate e sviluppabili, fino alla loro applicazione nelle tecniche stereotomiche usate nelle costruzioni in pietra da taglio più comuni, descrivendo minuziosamente tutte le costruzioni geometriche e le tecniche per il taglio dei conci anche attraverso un serie di tavole (*planche*) molto ben rappresentate.

Alla proposizione 373 del suo trattato⁵⁰, Adhèmar introduce in maniera esplicita, la struttura del problema stereotomico, secondo l'autore esso si compone di cinque momenti progettuali e costruttivi:

- scelta dei piani di proiezione,
- scelta dello spessore della volta e dei piedritti e quindi dell'apparecchiatura,
- determinazione delle superfici dei giunti,
- ribaltamento e sviluppo delle superfici delle diverse facce dei giunti,
- tracciamento dei giunti sui conci e loro taglio.

Mentre alla 492⁵¹, spiega chiaramente come, per attraversamenti obliqui caratterizzati da una grande inclinazione, il paramento voltato d'intradosso sia sempre una superficie cilindrica sebbene non si possano usare come superfici dei giunti continui i piani che contengono le generatrici del cilindro perché comporterebbero pericolose spinte a vuoto. Se si considera la figura 5.2. le risultanti delle pressioni p e q sui piani delle generatrici saranno perpendicolari alla direttrice del cilindro ma formeranno angoli acuti con i piani di imposta, dove scaricano le forze. Le componenti

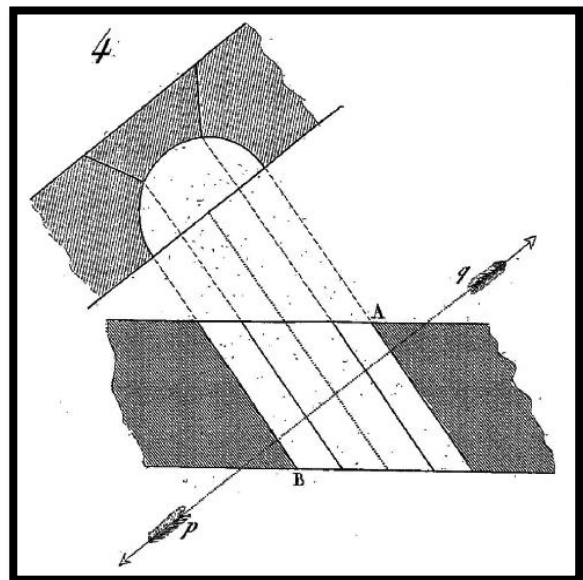


Fig. 5.2. J.A. Adhèmar. *Traité de la Coupe de pierre*. (Pl.66, Img4).

⁴⁹ ADHÉMAR, J. A., *Ponts biais en pierre et en bois*. cit. p. 372.

⁵⁰ *ibidem*, p. 184.

⁵¹ *ibidem*, p. 373.

verticali di queste risultanti sono dette *spinte a vuoto*.

Adhèmar propone due soluzioni più efficaci a questo problema, adottando apparecchiature che permettano di riportare le risultanti delle pressioni su un piano parallelo al piano dell'arco d'ingresso e di uscita della volta, in modo da scaricare le forze sui piani d'imposta in direzione ortogonale: *l'apparecchiatura ortogonale* ma soprattutto *l'apparecchiatura elicoidale*.

5.3. L'apparecchiatura ortogonale

Il paragrafo II è interamente dedicato all'apparecchiatura ortogonale, consigliata particolarmente per la realizzazione di ponti obliqui anche particolarmente inclinati ma con luci modeste, e che prevede superfici dei giunti passanti per un primo sistema di curve parallele alla direzione del percorso concepite dividendo l'arco d'imposta in conci e supponendo che i punti di divisione di ognuno di essi si muovano sulla superficie cilindrica parallelamente all'asse stradale. La costruzione di questo sistema dei giunti dipende da un principio di geometria descrittiva enunciato dall'autore: "*la projection d'un angle droit est un angle lorsque l'un des cotés de cet angle est parallèle au plan de projection*"⁵².

La curva trovata, a cui si dà il nome di *traiettoria*, taglia ad angolo retto tutte le sezioni parallele alle teste, e di conseguenza è perpendicolare alla tangente nel punto di incontro delle due curve; se si considera un piano di proiezione parallelo alle sezioni *vu* del paramento interno della volta o culla (*berceau*), la proiezione verticale *ab* della traiettoria è perpendicolare alla proiezione *mn* della tangente, che passa per il punto di incontro delle due linee di giunti. Una volta costruita una traiettoria basterà traslarla, in avanti o indietro sulla superficie cilindrica, per ottenere tutte le altre (fig. 5.3).

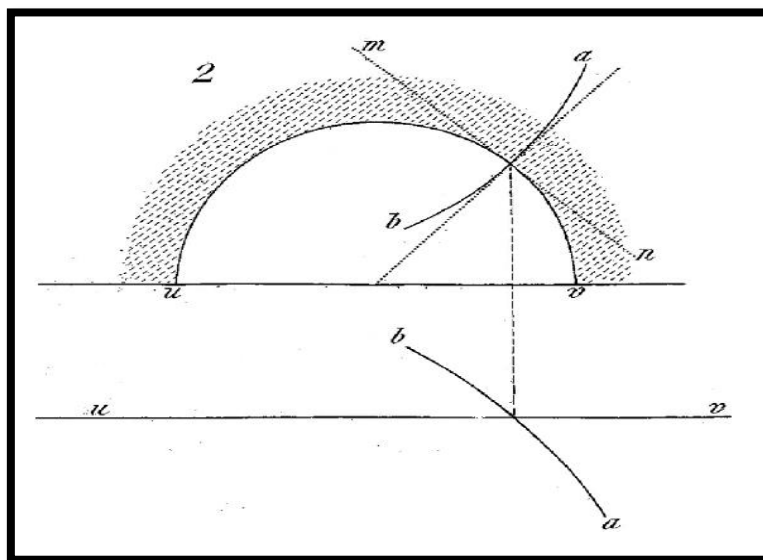


Fig. 5.3. J.A. Adhèmar. *Trait de la Coupe de pierre*. (Pl.66, Img2).

⁵² *ibidem*, p. 375.

Le superfici dei giunti risultano in ogni punto perpendicolari alla superficie di intradosso, in modo da avere angoli retti negli spigoli dei conci, a tale scopo vengono tracciate le normali alla superficie di intradosso nei punti di contatto con le curve. Queste normali, proiettate sul piano della sezione retta, si prolungano fino alla curva psq , che è la traccia del cilindro che forma l'estradosso della volta (fig.5.4).

Così, il punto n'' , proiettato in n (fig. 5.4/5 e 6), appartiene alla curva ysg , secondo la quale il cilindro di estradosso è intersecato dalla superficie normale che ha per direttrice il semi-cerchio cao . Si costruiranno nello stesso modo tutti i punti della curva msr , che provengono dall'intersezione dell'estradosso con la superficie normale, che ha per direttrice la traiettorie xaz .

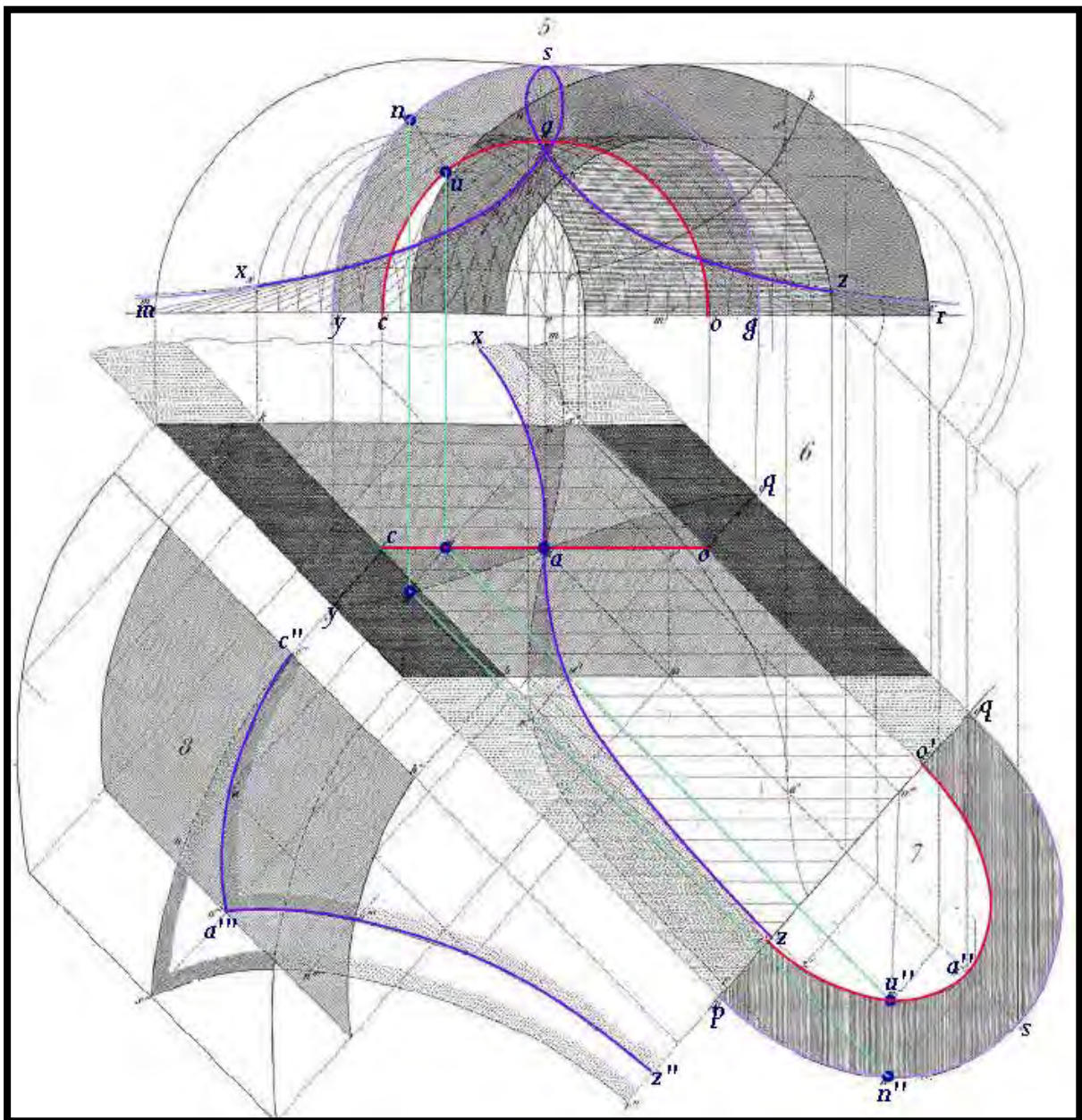


Fig. 5.4. J.A. Adhémar. *Trait de la Coupe de pierre*. (Pl.66, Img5, Img6, Img7, Img8).

Si può osservare che i due punti u, u' (fig. 5.4/5 e 6) sono alla stessa altezza, dato che le normali passanti per questi punti hanno una proiezione comune (fig. 5.4/7), e possono essere determinati con una sola operazione che permetterà di costruire nello stesso tempo le due curve ysg, msr . La proiezione verticale della curva msr formerà un anello e la proiezione della traiettoria xaz avrà un punto di cuspidè in a . La figura 5.4./8 contiene gli sviluppi dei due cilindri d'intradosso e di estradosso e la curva $a'''z''$ corrisponde allo sviluppo della traiettoria.

Alla proposizione 513⁵³, Adhémar muove una critica a questo tipo di apparecchiatura, affermando che, soprattutto al crescere della luce, le proiezioni verticali delle normali alla volta si confonderanno con quelle delle tangenti alla traiettoria, da ciò risulta che il cilindro, proiettando questa curva, sarà tangente alla superficie rigata (*réglée*) normale (fig.5.4/5). Quest'ultima superficie, indipendentemente dalla semplicità della sua generazione, soddisfa le condizioni di stabilità; è evidente come le forze, che provengono dalla pressione esercitata sui giunti per il peso delle basi superiori, saranno in questo caso agenti su dei piani tangenti all'intradosso, mentre la risultante di tutte le pressioni che agiscono sui giunti longitudinali saranno di conseguenza riportati in un piano parallelo alle teste.

⁵³ *ibidem*, p. 381.

5.4. Le nozioni sul taglio e la posa dei conci

Come detto, il ruolo del progettista sulla costruzione di un'opera stereotomica va oltre il suo semplice dimensionamento e disegno, ma deve fornire gli strumenti e le tecniche necessarie per il taglio e la posa dei conci. Il paragrafo V⁵⁴ e la tavola 67 sono interamente dedicati alla tecnica costruttiva di un'arcata obliqua in pietra da taglio con apparecchiatura ortogonale, e alle nozioni necessarie alle maestranze per l'esecuzione del taglio dei conci, dallo sviluppo del paramento interno della volta (*la douelle*) (fig. 5.5/22), a quella dei giunti (fig. 5.5/23).

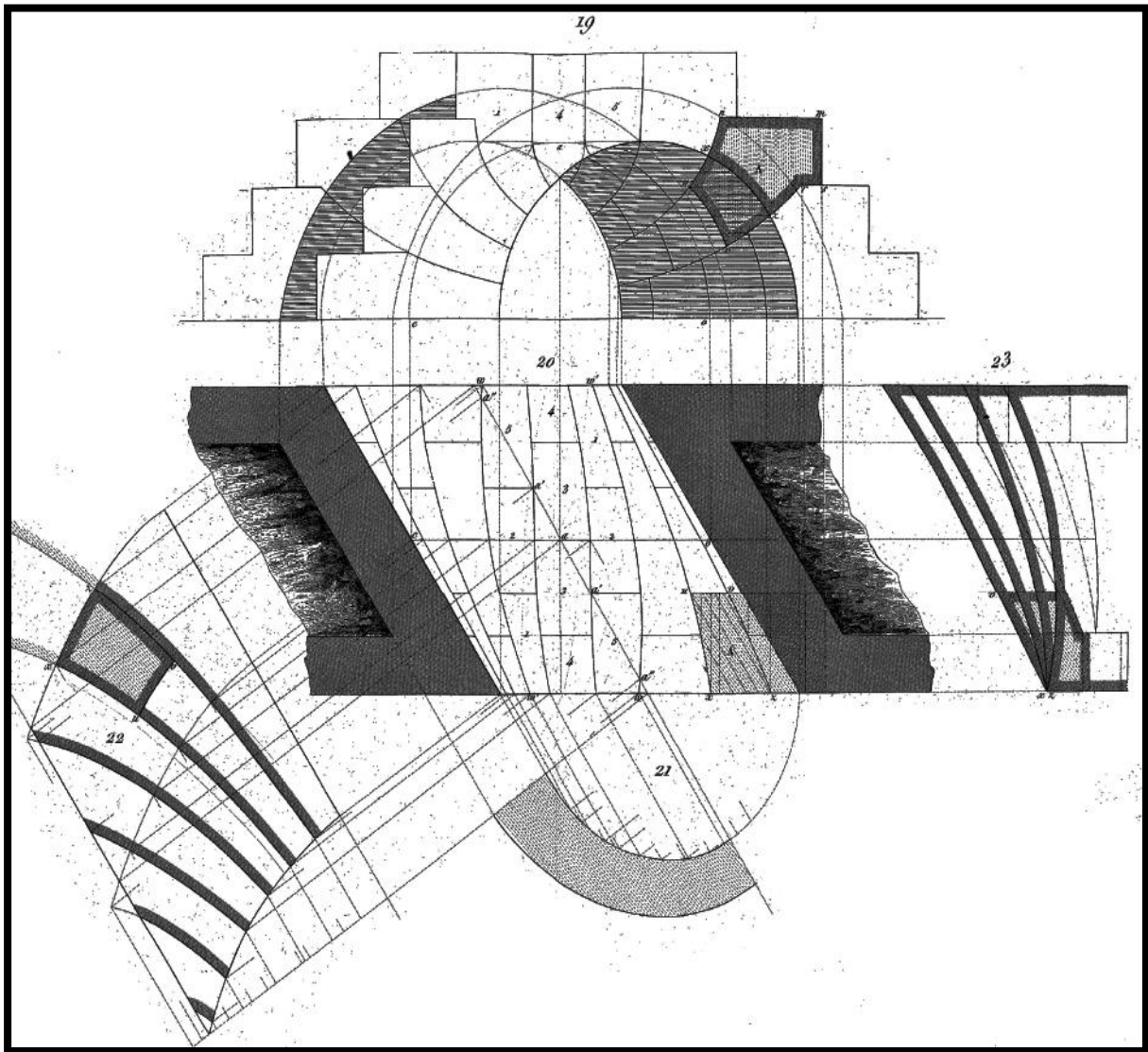


Fig. 5.5. J.A. Adhémar. *Trait de la Coupe de pierre*. (Pl.67, Img. 19, Img20, Img21, Img22, Img23).

Il taglio dei conci. Si affronta la tecnica per il taglio di un singolo concio (*voussoir A*). Una volta preparata la pietra su un pannello di proiezione verticale *mnuvrs* (fig. 5.5/19), si tagliano i due giunti cilindrici *nu*, *vr* (fig.5.6). In seguito, si applica il pannello di testa *mnxzrs*, e si tracciano nelle superfici

⁵⁴ *ibidem*, p. 383

dei giunti le due curve xu , zv , prendendo le ordinate di queste curve e servendosi dei pannelli di sviluppo (fig. 5.5/23).

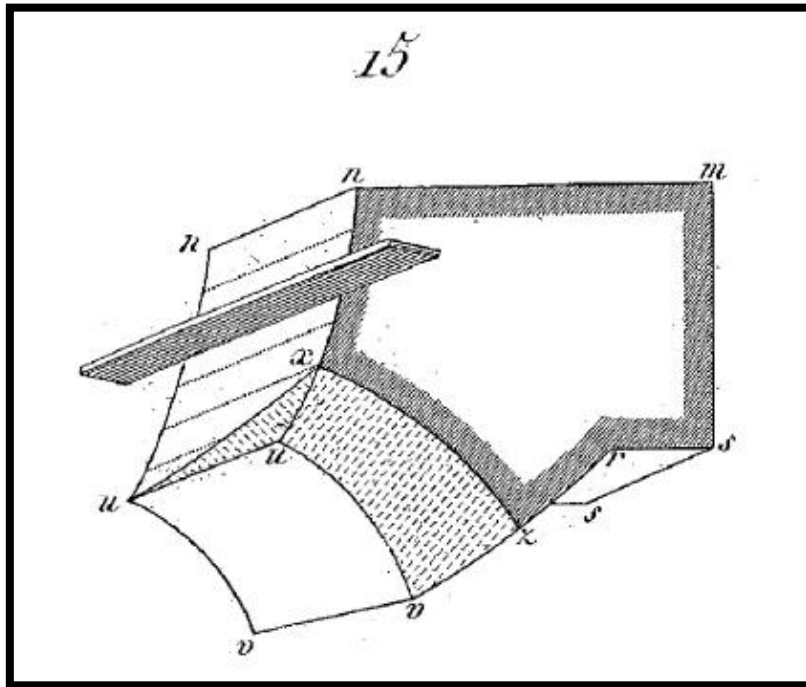


Fig. 5.6. J.A. Adhémar. *Trait de la Coupe de pierre*. (Pl.67, Img. 15).

Infine, si taglierà la superficie cilindrica del paramento interno della volta (*la douelle*), facendo scivolare una riga (*regolo*) sulle quattro curve xu , xz , uv , zv , dopo aver segnato su queste curve i punti di riporto dati con le proiezioni 19 e 20 della figura 5.5. Le linee tracciate per punti sulla proiezione orizzontale della pietra A (fig. 5.5/20), sono le generatrici delle superfici cilindriche del paramento della volta e dei giunti, mentre le parallele alla culla sono le generatrici del paramento e le linee perpendicolari ai piani di testa corrispondono alle generatrici delle superfici dei giunti.

La posa. I giunti della chiave e delle pietre adiacenti sono formate da due superfici cilindriche, curvate in senso contrario e si toccano seguendo l'orizzontale proiettata che contiene il punto più alto della traiettoria, ciò che produce il punto di cuspide a sulla proiezione verticale di questa curva, menzionato in precedenza. Questa differenza di curvatura nei giunti si oppone alla posa dei conci (*voussoirs*), se non si prendono le giuste precauzioni:

- Si deve disporre l'apparecchio in modo da far passare un giunto trasversale per ciascuno dei punti a' , a' che corrispondono al cambio di curvatura dei giunti continui.
- Si devono porre le pietre nell'ordine indicato dalle cifre sulla proiezione orizzontale (fig. 5.5/20).

5.5. Le nozioni di natura Statica

L'autore parte dal presupposto che tutte le forze che tendono a far scivolare le pietre sui loro giunti siano riportate in un piano parallelo alle teste della culla, quindi, attribuisce ai piedritti una resistenza sufficiente, supponendo un'esattezza di taglio impossibile da raggiungere nelle applicazioni pratiche; in teoria, la volta di un ponte obliquo può essere studiata considerando forze costanti che agiscono su di essa, ma l'equilibrio che si stabilisce in quest'ipotesi, si perde a causa dei carichi risultanti dal passaggio di una macchina o di un treno.

Adhémar, al paragrafo VI⁵⁵, spiega come combattere tutte le cause di rottura o di deformazione che possono verificarsi, non solo dal peso proprio dei materiali che compongono la volta, ma anche dai carichi accidentali che sono destinate a sopportare. Così va considerato che tanto l'assestamento delle terre, quanto il passaggio delle automobili o la presenza di carichi che possono momentaneamente stazionare sul tracciato, cambiano ad ogni istante le direzioni delle forze che agiscono sulle diverse componenti di una volta, e mentre qualcuna di queste parti, premute in un senso, tende a scendere, le altre, sollecitate in senso contrario, tendono a risalire sui loro giunti. E' dunque indispensabile, quando una volta è esposta a delle pressioni cui la direzione e l'intensità sono molto variabili, che tutte le sue parti siano legate tra di esse in modo considerevole affinché, il cambiamento di direzione nelle forze che agiscono su di essa, non possa mai far scivolare le pietre lungo i giunti, né farli girare attorno agli spigoli.

L'autore chiarisce specificatamente che occorre considerare la volta come formata da un'unica parte, questo risultato può essere ottenuto soltanto dall'uso della malta o di rinforzi destinati a legare tra esse tutte le parti, ma il procedimento conduce a studiare la questione dell'equilibrio da un altro punto di vista: la malta infatti, al momento del restringimento, assume un comportamento significativamente diverso da quello dei conci, alcuni giunti tendono a comprimersi, mentre altri al contrario tendono ad allargarsi, imprimendo alla volta una deformazione che la porta ad una configurazione ben diversa da quella originaria.

⁵⁵ *ibidem*, p. 387.

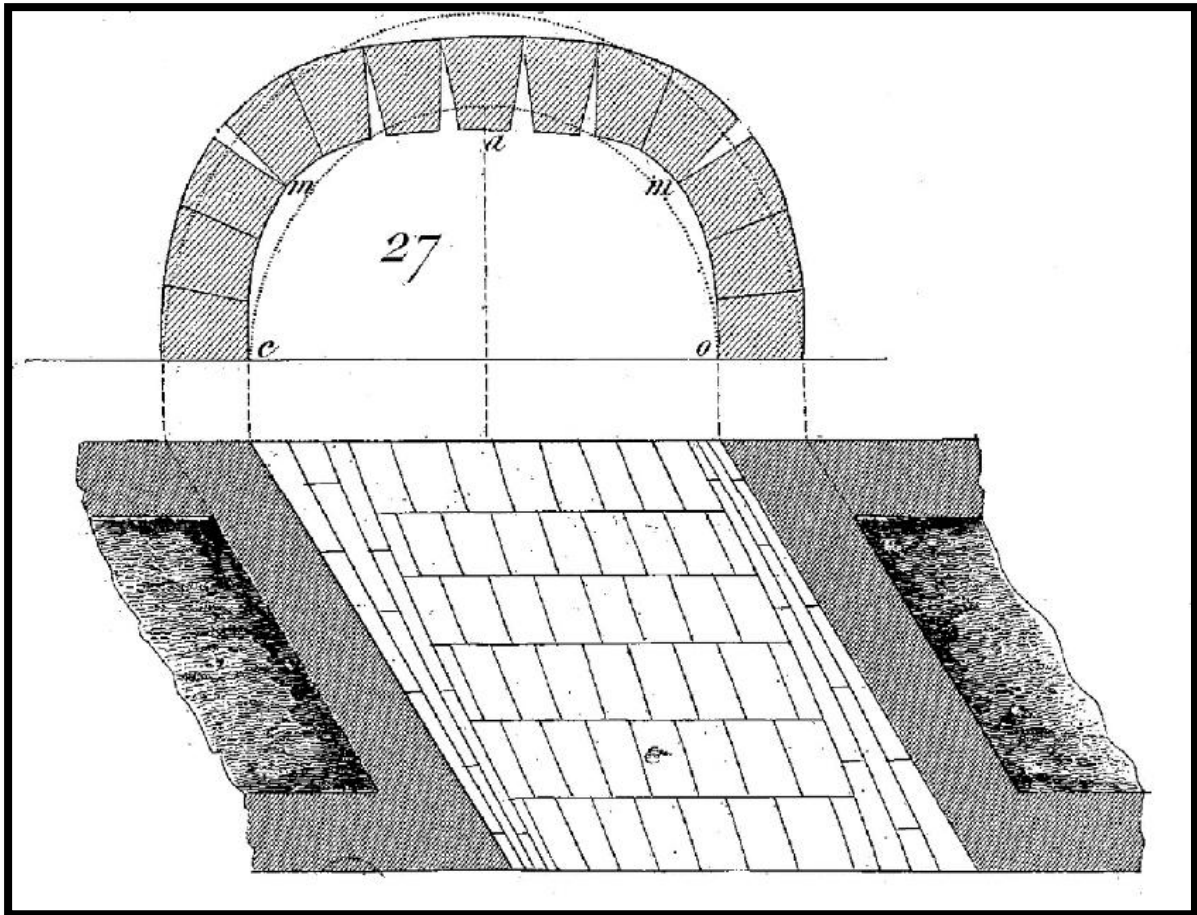


Fig. 5.7. J.A. Adhémar. *Trait de la Coupe de pierre*. (Pl.67, Img. 27).

Adhémar, in questo caso, dimostra tutta la sua esperienza, anticipando gli studi più moderni sull'analisi plastica dell'arco, e getta le basi per l'individuazione dei *criteri di rottura*. Nella figura 5.7. si nota come i giunti centrali si aprano verso il basso, mentre al contrario quelli più vicini alle generatrici si aprano verso l'alto, in modo che la chiave e i conci di testa tendano a scendere respingendo al contrario in alto i punti *m, m* chiamati *giunti di rottura*, perché è all'altezza di questi punti che la volta si spezzerebbe se la pressione superasse il limite massimo.

5.6. L'apparecchiatura elicoidale

L'autore, nel paragrafo X⁵⁶, ammette la provenienza britannica della soluzione elicoidale e ne precisa da subito le peculiarità: questo tipo di costruzione, scrive, si presta particolarmente bene per l'utilizzo del mattone o comunque di pietra di piccola pezzatura, visto che lo spessore uniforme dei blocchi non genera la disegualianza provocata dall'allontanamento dei conci dalle traiettorie ortogonali.

La tavola 70, riportata nella fig. 5.8, contiene i dettagli relativi alla costruzione dei ponti obliqui con apparecchiatura elicoidale, così chiamata perché gli spigoli dell'intradosso sono delle eliche: le figure 5.8/3 e 6 sono le proiezioni verticali ed orizzontali della volta costruita su pianta trapezoidale, con l'arco di testa che appartiene ad una circonferenza circolare di centro O . La sezione retta del cilindro d'intradosso è di conseguenza l'ellisse nvu ribaltata nel piano orizzontale (fig. 5.8/6), facendola ruotare attorno alla corda nu situata all'altezza della generatrice della volta.

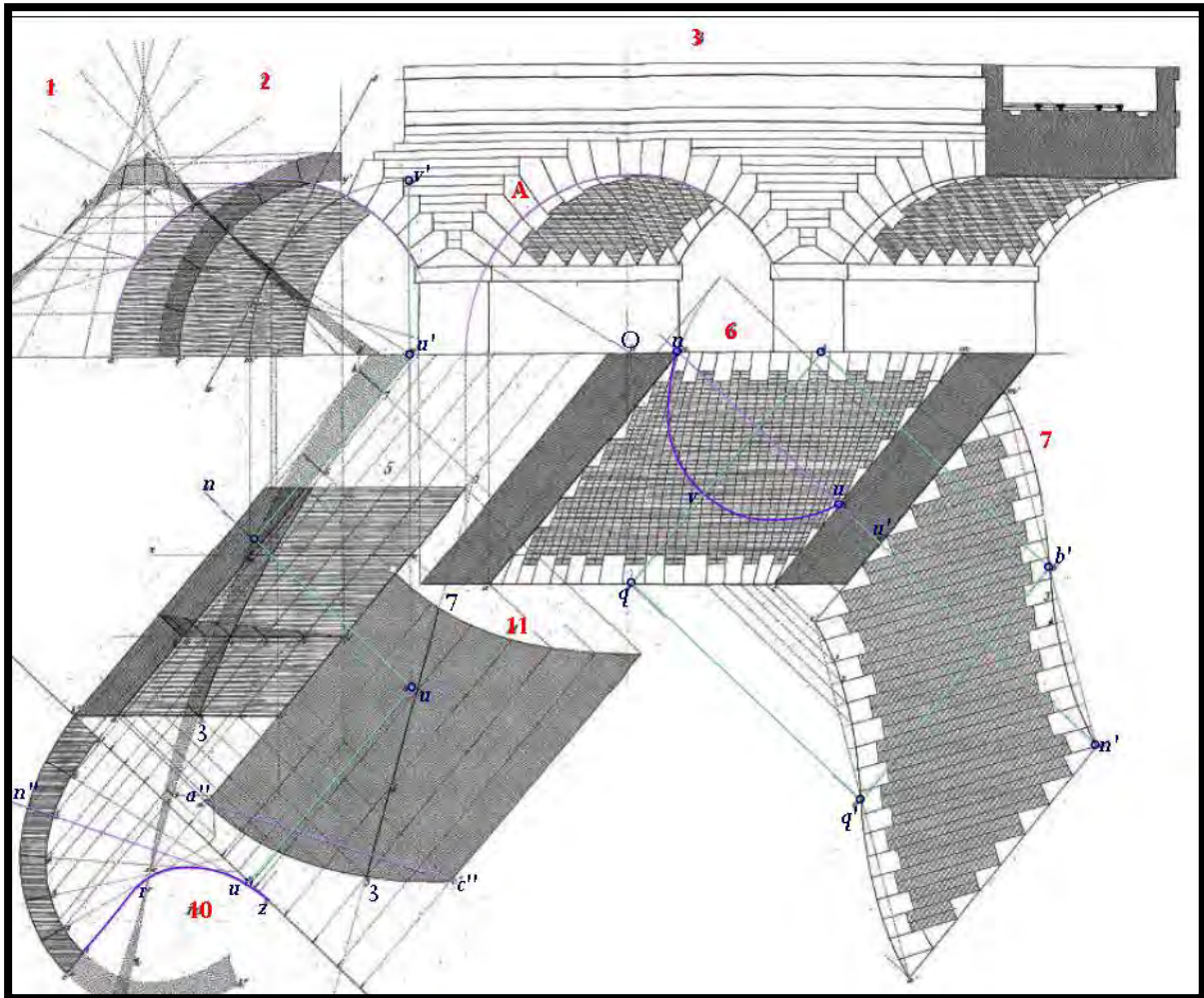


Fig. 5.8. J.A. Adhémar. *Trait de la Coupe de pierre*. (Pl.70, Img. 3, Img. 5, Img. 6, Img. 7, Img. 10, Img. 11).

⁵⁶ *ibidem*, p. 404.

Il cilindro d'intradosso di una delle due volte rappresentate nella figura 5.8/3 e 6, viene sviluppato nella figura 5.8/7; la sezione retta e una parte dello sviluppo del paramento interno della volta sono rappresentate rispettivamente nella figura 5.8/10 e 11. La retta 3-7 perpendicolare alla corda a''c'' è lo sviluppo sul piano dell'elica che contiene il punto 3 dell'arco di testa. I punti in cui l'elica (fig. 5.8/11) interseca le generatrici del cilindro, nello sviluppo, permettono di poter tracciare, attraverso le proiezioni verticali ed orizzontali, l'elica richiesta. La curva così ottenuta servirà a tracciare tutte le altre, attraverso una traslazione nella direzione del cilindro.

Successivamente, così come fatto per l'apparecchiatura ortogonale, per ciascuno dei punti dell'elica ottenuta si costruirà una normale alla superficie di intradosso, la proiezione orizzontale un di questa normale sarà perpendicolare alla traccia orizzontale del piano tangente e, di conseguenza, alla direzione del cilindro; per far ciò il punto u' viene proiettato in u'' nella figura 5.8/10, mentre la retta $u''n''$ sarà la proiezione della normale sul piano della sezione retta del cilindro. Applicando ripetutamente lo stesso procedimento si determineranno tutte le normali.

La proiezione di ciascuna di queste linee, mostrate nella figura 5.8/2, dovrà passare per il centro della sezione circolare che contiene i punti corrispondenti dell'elica mentre le proiezioni di tutte le normali devono essere tangenti alla curva zr che corrisponde allo sviluppo dell'ellisse della sezione retta ripiegata (fig. 5.8/10). La costruzione di questa curva facilita la verifica delle normali.

Anche in questo caso Adhémar fornisce indicazioni pratiche sul taglio dei conci e evidenzia le difficoltà che si possono incontrare in queste operazioni. Il taglio di queste pietre sarà un po' meno semplice rispetto all'apparecchiatura ortogonale dove i giunti dei conci possono essere tagliati secondo piani perpendicolari agli archi di testa. In effetti, nell'apparecchiatura elicoidale le eliche, che formano gli spigoli d'intradosso, non incontrano gli archi di testa seguendo degli angoli retti e, se le superfici normali fossero prolungate fino al piano di testa, la linea dei giunti che risulta dall'incontro di queste due superfici corrisponde ad una curva. A questo proposito l'autore suggerisce un'approssimazione consentita dell'esigua curvatura di queste curve, soprattutto nei ponti con volte di grandi luci. I piccoli tratti di curva, spigoli laterali dei conci di testa, si possono sostituire con segmenti di retta perpendicolari all'arco di testa, considerando rettilinea la piccola porzione d'elica compresa tra la testa della pietra e il piano verticale che determina la quota della volta. In questo modo, ogni piano dei giunti del singolo concio di testa sarà completamente determinato. Il concio A , che è proiettato nella figura 5.9/12 e 13 in A' , avrà: il primo giunto determinato dalla la retta 1-2, normale all'arco di testa (fig. 5.9/12) e la corda 1-3 (fig. 5.9/13), e il secondo giunto determinato con la normale 5-6 (fig. 5.9/12) e con la corda 5-7 (fig. 5.9/13). Dopo aver alzato i due pannelli verticali 1-6 e 3-8 (fig. 5.9/13), si tratterà il pannello 1-2-5-6 nel piano 1-6 e

il pannello 3-4-7-8 nel piano 3-8, i pannelli dei giunti ripiegati in B e C completeranno le tracce di tutti i tagli.

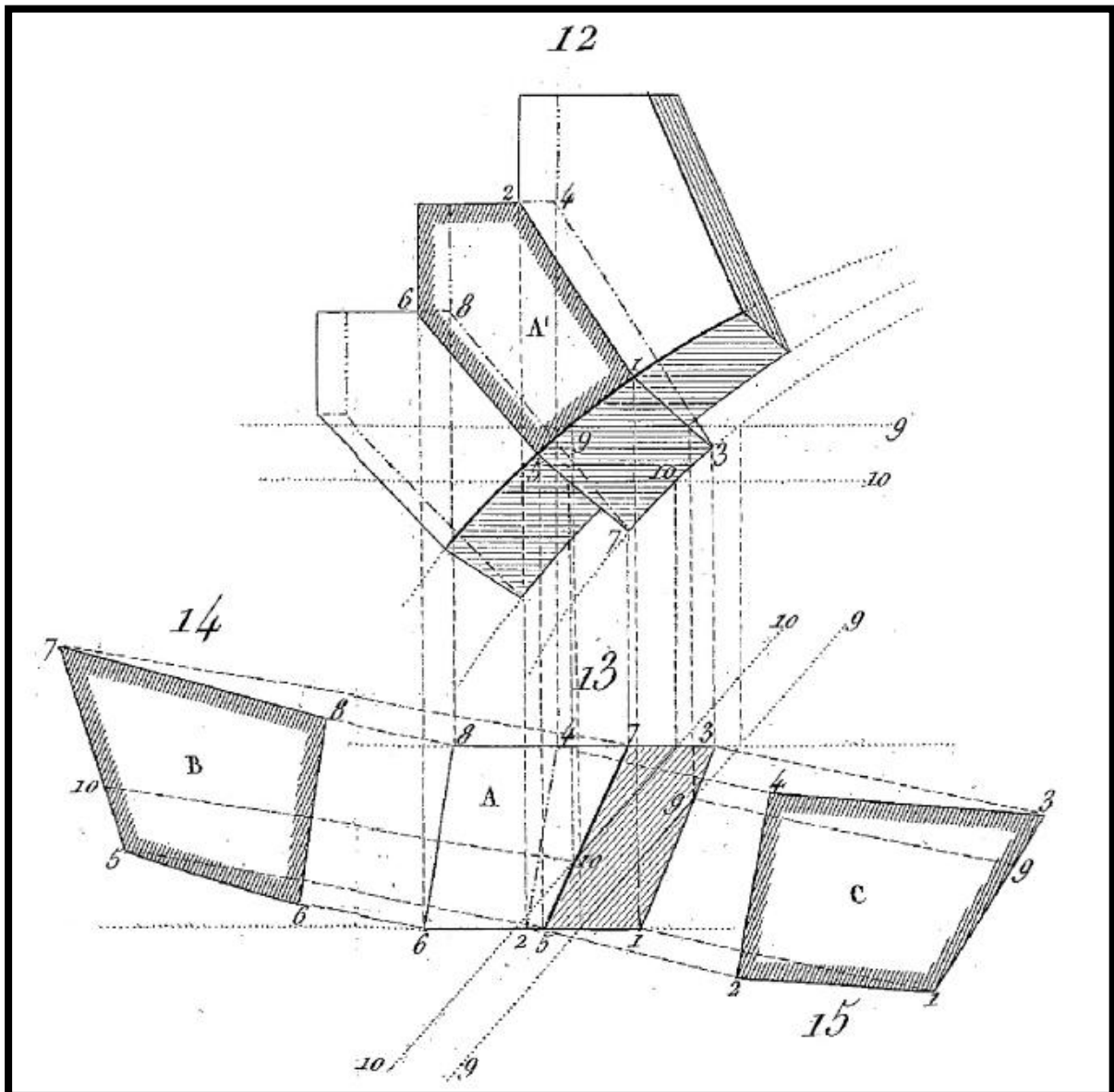


Fig. 5.9. J.A. Adhémar. *Trait de la Coupe de pierre*. (Pl.70, Img. 12, img. 13, img. 14, img. 15)

Il paramento interno sarà sagomato facendo scivolare un regolo sui bordi ottenuti, considerando la posizione orizzontale come punto di riferimento, e segnandolo in corrispondenza delle quote del quadrilatero a sinistra, 1-5-7-3, per il taglio del concio adiacente.

La superficie normale proiettata nella figura 5.8/1 e 2, differisce molto poco dal cilindro proiettante, che è la sola superficie di giuntura che possa fare sparire completamente la spinta al vuoto: è questo l'aspetto fondamentale che consente a questo tipo di apparecchiatura di essere la più efficace sia a livello statico che a livello geometrico. Si osserverà ancora, che la superficie normale ricercata, si avvicina molto al cilindro proiettante dell'elica 3-5 (fig. 5.8/3), nella parte della volta che sta al di

sopra del piano generatore delle due culle proiettate nella figura 5.8/3, dove risulta che la spinta a vuoto è inferiore, per questo motivo i progettisti preferiscono usare delle volte a sesto ribassato, avendo come curve direttrici degli archi di cerchio, invece di culle con l'intradosso formato da una sezione semicircolare.

Chiaramente, alla proposizione 444⁵⁷, l'autore enuncia che le difficoltà che si incontrano nello studio di un caso complesso, quale quello della costruzione di un ponte obliquo con apparecchiatura elicoidale, derivano dalla incompatibilità che esiste tra vincoli o considerazioni di tipo geometrico, di tipo meccanico e di tipo costruttivo. Volendo soddisfare la condizione geometrica principale, quella cioè di non avere in nessun caso conci con angoli acuti, una regola questa che era presente, anche se implicitamente, nella stereotomia classica, si possono ottenere conci con giunti a doppia curvatura che mal si prestano alla pratica tecnica del taglio, oppure giunti con inclinazione contraria, rispetto a quanto richiesto dalle teorie sulla meccanica degli archi, con conseguenti rotazioni fuori piano, facendo insorgere pericolose spinte a vuoto. Rinunciare alla assenza di angoli acuti, d'altra parte, potrebbe portare alla rottura localizzata di alcuni spigoli dei conci, mentre privilegiare l'aspetto costruttivo può portare a soluzioni d'apparecchiatura sconvenienti.

⁵⁷ *ibidem*, p. 292.

6. ANALISI GEOMETRICA DELL'APPARECCHIATURA ELICOIDALE

6.1 Introduzione

Non tutte le opere in pietra realizzate dall'antichità a oggi possono ritenersi "stereotomiche".

Nelle costruzioni in pietra da taglio si impiegano pietre estratte da cave e intagliate opportunamente in conci che tendono ad avere una forma quanto più possibile regolare e simile fra di loro. La forma e la posizione dei singoli conci deve essere tale da permettere la stabilità della costruzione indipendentemente dal materiale legante eventualmente impiegato; la malta infatti ha il solo scopo di riempire gli interstizi e ridurre le irregolarità dovute alla messa in opera ma, in linea teorica, non dà apporto strutturale. Le facce di ogni concio, adiacenti le une alle altre, sono chiamate *giunti*, mentre la facce esterne, quasi sempre in vista solo all'intradosso, sono dette *facce da paramento*.

Il problema stereotomico per le costruzioni in pietra da taglio si compone principalmente in tre sottoproblemi principali:

1. data una determinata forma da costruire, progettare il modo più conveniente per comporla in conci, il che equivale alla determinazione dell'*apparecchiatura*, cioè all'individuazione delle superfici che separano i giunti;
2. l'utilizzo delle nozioni di geometria descrittiva per una determinazione, più precisa possibile, delle forme che compongono l'*apparecchiatura*;
3. lo studio delle tecniche più efficaci per il taglio dei conci.

Detto ciò, è evidente come la scelta dell'*apparecchiatura* più opportuna nasce da svariate questioni che vanno dalla statica all'estetica e da considerazioni di carattere pratico legate all'esecuzione e al costo dell'opera. La stereotomia impone, dunque, alcune regole fondamentali per la determinazione di un'*apparecchiatura* efficiente ed efficace:

- la perfetta adiacenza tra le facce dei conci, in modo da distribuire le spinte in modo più uniforme possibile;
- la necessità di avere angoli retti negli spigoli dei conci, per evitare parti eccessivamente fragili.

Questi presupposti impongono l'utilizzo della geometria descrittiva nella progettazione dell'*apparecchiatura*, perché le linee dei giunti vanno scelte come linee di curvatura della superficie voltata, mentre le superfici di giunzione costituiscono le sviluppabili formate lungo le normali a

queste linee. In queste regole essenziali si concentra la scelta più opportuna anche se essa non sempre risulta possibile.

Rimanendo sempre nell'ambito di un'applicazione stereotomica ideale specifichiamo che: i conci di un'apparecchiatura si distribuiscono generalmente lungo *filari* le cui superfici, costituite dai diversi giunti adiacenti, vengono dette *letti di posa*. Normalmente i giunti che dividono i conci lungo uno stesso filare sono sfalsati rispetto al filare adiacente, perciò si distingue il letto di conci *continuo* da quello *discontinuo*.

L'*apparecchiatura elicoidale*, come detto, viene di solito utilizzata nel caso della volta obliqua: volte cilindriche con asse inclinato rispetto ai piani frontali, che generalmente contengono archi ellittici. Il principio costruttivo da cui deriva il dispositivo elicoidale prevede che le superfici di giunzione dei conci siano tutte perpendicolari tra di loro (ad eccezione di piccole approssimazioni) e che i conci che compongono la volta siano tutti uguali, condizione che offre notevole risparmio di tempo durante la lavorazione e l'assemblaggio del lavoro. L'apparecchiatura, che prende forma da queste condizioni di vincolo è formata da conci, tutti uguali (escludendo i conci frontali e di quelli d'imposta), ognuno dei quali costituiti da due superfici cilindriche (*svilupabili*), una d'intradosso ed una d'estradosso, e da quattro superfici elicoidali (*rigate*), le superfici di giunzione tra i conci, che, in particolare, si definiscono elicoidi chiusi e retti a piano direttore⁵⁸. Le eliche che delimitano questi elicoidi, formano i bordi continui e discontinui dei giunti, ed hanno l'asse in comune con i cilindri d'intradosso e di estradosso della volta.

⁵⁸ Vedi Appendice 2.3: *L'Elicoidale a piano direttore, chiuso e retto*.

6.2. Geometria dell'Apparecchiatura elicoidale

L'uso di superfici rigate e sviluppabili in stereotomia trova risposte significative nelle applicazioni relative ad una particolare famiglia di volte, le volte cilindriche oblique, che dimostrano l'efficacia delle proprietà di queste superfici applicate all'architettura della pietra: le volte oblique cilindriche costituiscono uno dei casi più complessi in ambito stereotomico. L'interesse deriva in particolare dai problemi strutturali e geometrici che si verificano in condizioni di obliquità molto pronunciata, di solito, nelle volte diritte, le superfici di giunzione dei conci sono piane e appartengono alle linee di curvatura di intradosso del cilindro (paramento interno della volta), cioè alla sua generatrice e le sue sezioni diritte. Se si adottasse la stessa apparecchiatura nel caso delle volte oblique, le teste dei conci sarebbero soggette a delle forze oblique non neutralizzate (*spinte a vuoto*) e la stabilità della struttura risulterebbe compromessa. Oltre alle limitazioni di natura strutturale, nella progettazione delle volte oblique si deve tener conto di una serie di vincoli legati alle sezioni dritte del cilindro cavo, corrispondenti ai due archi frontali ellittici, dunque, un'equa distribuzione delle due arcate anteriori costituisce un problema geometrico ed estetico di difficile soluzione.

La storia della stereotomia restituisce molti dispositivi che cercano di generalizzare e risolvere il problema: l'*apparecchiatura ortogonale*, in cui la disposizione dei conci interni segue l'andamento della volta retta con i giunti longitudinali posti lungo le generatrici del cilindro, essa viene usata per volte con piccoli angoli di obliquità; l'*apparecchiatura ad archi concentrici*, in cui i conci sono sistemati secondo archi retti sistemati a risega lungo la direzione normale ai lati del fronte, usato per passaggi di piccole dimensioni. Alcuni dispositivi approssimano la soluzione, altri sono particolarmente complessi perché sono composti da conci tutti diversi tra loro che rendono molto difficile l'elaborazione e il lavoro di assemblaggio. Intorno alla metà del XIX secolo, si diffonde, come detto, in Inghilterra un modello chiamato "*apparecchiatura elicoidale*". Questo dispositivo, grazie alle proprietà delle superfici rigate e sviluppabili è l'unico che risolve il problema della volta obliqua in tutti i suoi aspetti, indipendentemente dalla forma geometrica della volta e dalle sue dimensioni, nel rispetto del principio stereotomico della serialità dei conci e delle regole geometriche.

Come già spiegato, il dispositivo elicoidale viene di solito utilizzato nel caso della volta obliqua: volte cilindriche con asse inclinato rispetto ai piani frontali, che coprono aree aventi forma di parallelogramma. La superficie d'intradosso della volta è una porzione di cilindro retto sezionato con due piani obliqui rispetto all'asse generando archi di testa ellittici che si proiettano sul secondo piano di proiezione come dei cerchi (fig. 6.13).

Per controllare questo tipo di dispositivo, è di grande utilità creare il piano di sviluppo della superficie cilindrica d'intradosso che, nel caso di un cilindro obliquo, tenendo presente che la misura di una semicirconferenza rettificata è pari a πr , restituisce una porzione di spazio delimitata da due rette parallele AB e CD e due sinusoidi $A'D$ e $B'C$, sviluppi dei profili ellittici delle sezioni oblique del cilindro (fig. 6.10).

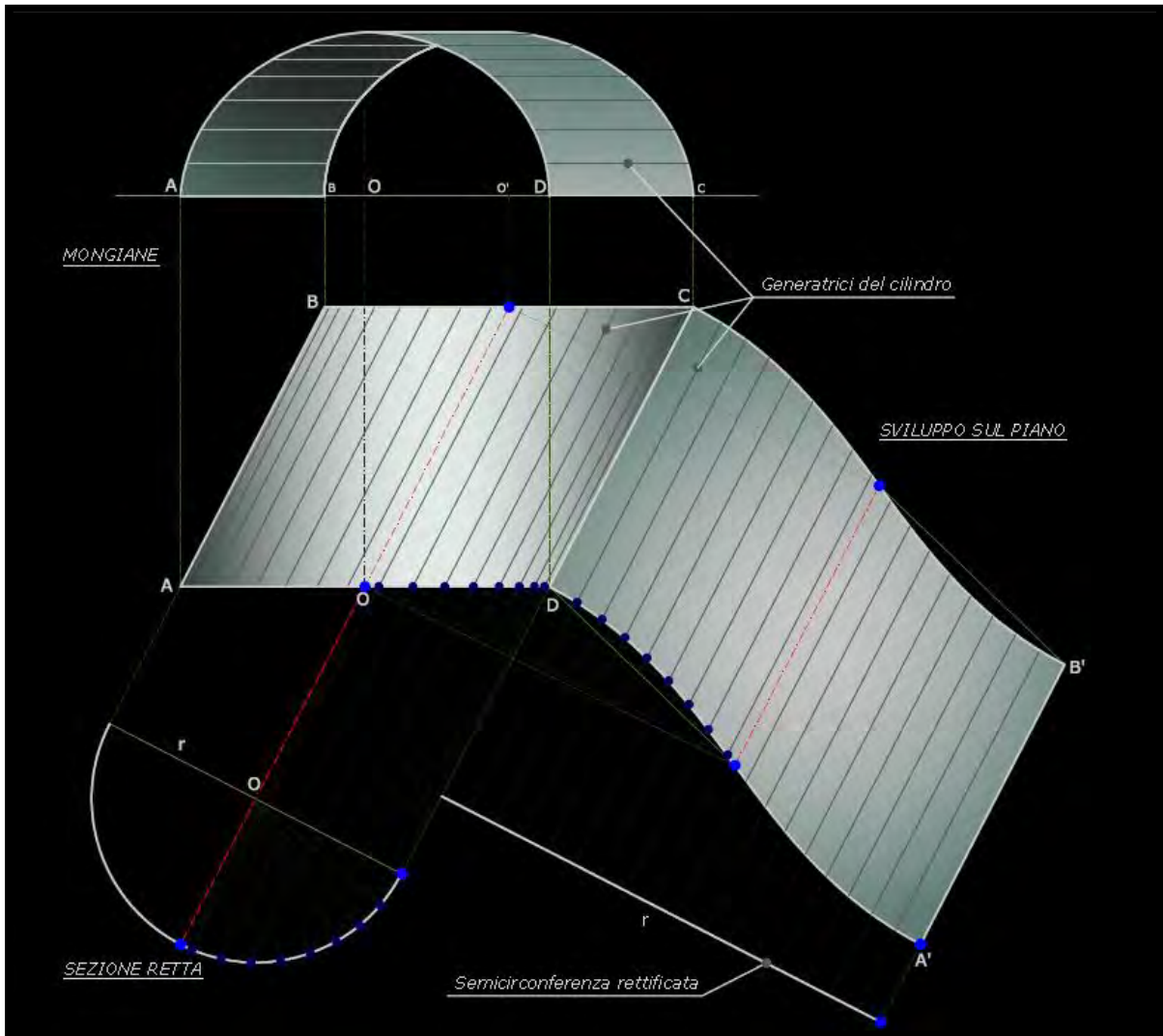


Fig. 6.10. Sviluppo sul piano della superficie cilindrica.

Costruito lo sviluppo del cilindro circolare $A'DCB'$ è necessario determinare il numero di conci che si vogliono ottenere sull'arco di testa della volta: è consigliabile dividere la corda CB' in un numero dispari di componenti, per esempio 17, per avere un concio in posizione centrale che sarà quello di chiave.

I bordi di giunzione continui e discontinui dei conci corrispondono a due sistemi di eliche cilindriche aventi lo stesso asse e diametro ma con passi differenti (fig. 6.15), l'elica cilindrica è una curva geodetica che nel suo sviluppo nel piano diventa una linea retta⁵⁹.

Per ogni punto individuato nella suddivisione della corda si conduca una perpendicolare ad essa, che sarà lo sviluppo in direzione longitudinale di un'elica cilindrica sulla superficie sviluppata del cilindro in esame, essa corrisponde alla linea dei giunti continui (fig. 6.11).

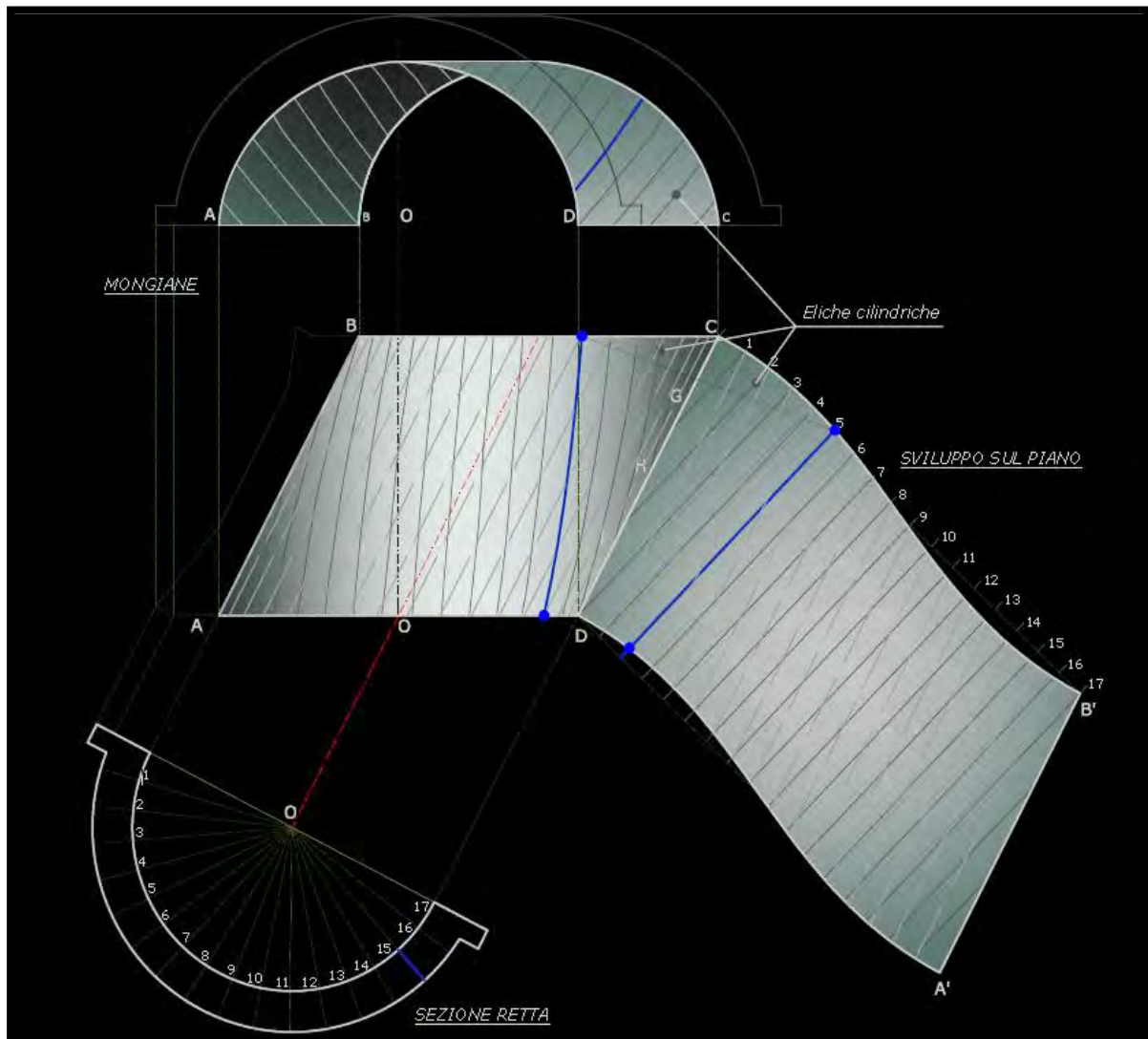


Fig. 6.11. Traccia delle eliche cilindriche (giunti continui) sulla superficie cilindrica.

I filari continui devono dividere la superficie in un numero esatto, in modo che la linea di giunzione che parte dal vertice D (e B') passi necessariamente attraverso uno dei punti di partizione della corda, se questo non avviene, si procede con un'approssimazione congiungendo la perpendicolare con il punto di suddivisione più prossimo ad esso, ciò permette di mantenere la giunzione continua delle eliche il più possibile perpendicolare agli archi di testa. Tutte le rette parallele a questa

⁵⁹ Vedi Appendice 2.2: Lo Sviluppo del cono e del cilindro sopra un piano.

congiungente incarnano lo sviluppo delle eliche longitudinali che formano le linee dei giunti del letto di conchi continuo.

Le linee dei giunti del letto di conchi discontinuo (secondo sistema di eliche cilindriche), sono rappresentate nello sviluppo da rette parallele alle corde DA' e CB' e la loro disposizione è determinata, garantendo l'alternanza, e facendole obbligatoriamente passare per i punti H ed I , d'intersezione tra le linee dei giunti continui e i piani d'imposta AB (sviluppato in $A'B'$) e DC (fig. 6.12).

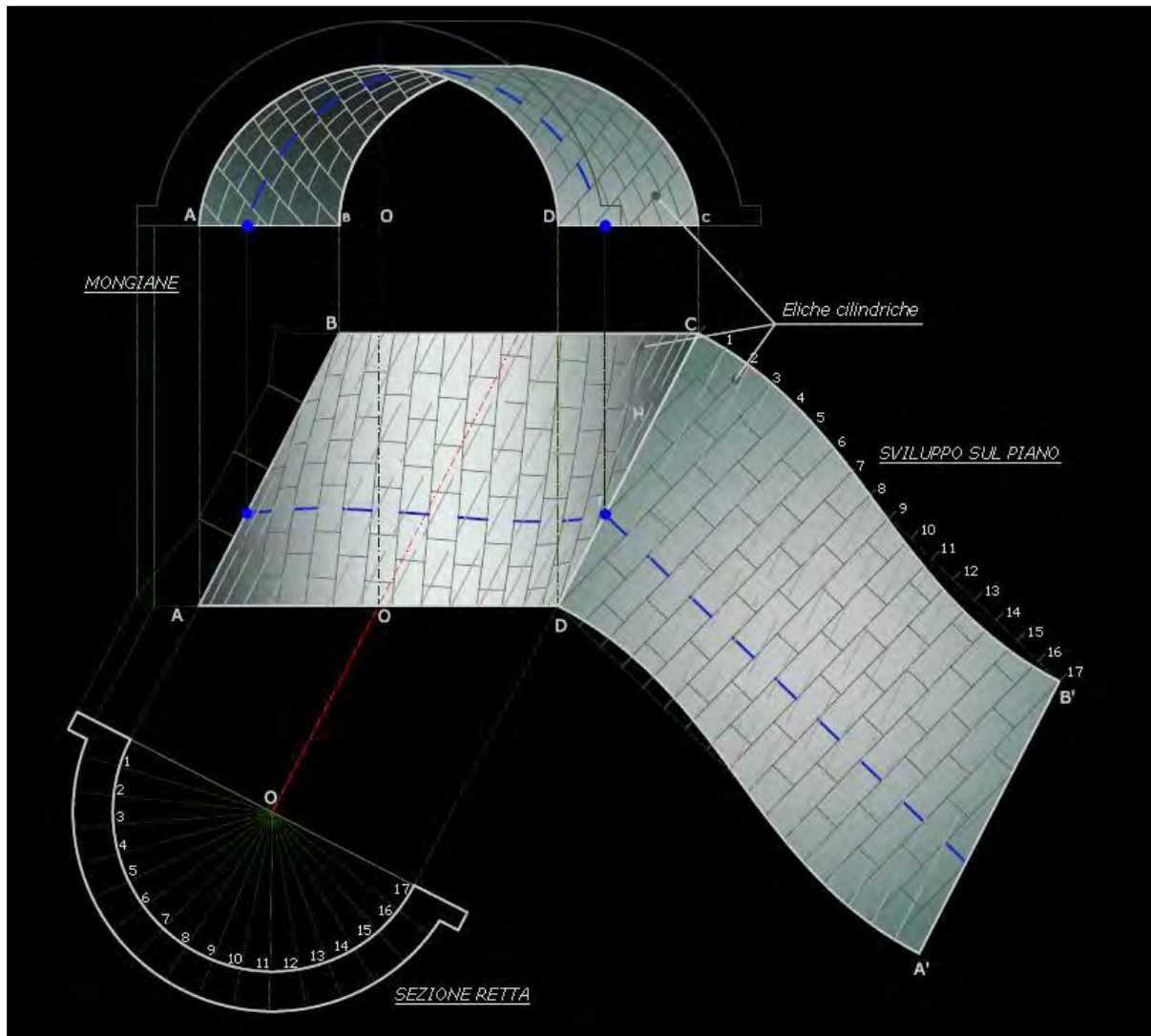


Fig. 6.12. Traccia delle eliche cilindriche (giunti discontinui) sulla superficie

Le superfici dei giunti laterali dei conchi sono costituite dalle rigate ortogonali alla superficie cilindrica lungo i due sistemi di eliche suddetti. Queste superfici rigate corrispondono a elicoidi retti tutti uguali secondo i due sistemi di giunti continuo e discontinuo, elicoidi retti facenti riferimento ad un piano direttore perpendicolare all'asse del cilindro (fig.6.16 e 6.17).

Attraverso la rotazione dell'elicoide longitudinale e la traslazione dell'elicoide trasversale rispetto all'asse del cilindro è possibile ottenere le superfici di tutti i singoli conci che compongono il paramento.

Nell'apparecchiatura elicoidale si possono distinguere, quindi, tre tipi di conci differenti:

- I *conci interni* alla volta, che hanno le quattro facce laterali formate da elicoidi retti e quindi rappresentano le superfici minime di giunzione tra gli spigoli che li delimitano (proprietà dell'elicoide retto); il singolo concio potrà essere spostato con un movimento elicoidale, sia nel senso longitudinale che trasversale, sovrapponendosi al concio successivo senza scarti, ciò implica la serialità dei conci interni, prerogativa principale dell'apparecchiatura elicoidale (fig. 6.23).
- I *conci frontali o di testa* sono molto simili a quelli interni, con l'unica differenza di avere una faccia, visibile nell'arco di testa, piana e non curva, le loro dimensioni sono diverse e dipendono dalla loro posizione rispetto al piano obliquo (fig. 6.23).
- I *conci d'imposta*, uniti molto spesso ad un cuscinetto con base orizzontale che aumenta la robustezza e ne consente un inserimento coerente con la costruzione, sono composti da un prisma retto a sezione pentagonale e da un ulteriore pezzo costituito da due facce cilindriche "triangolari", che sono quelle di intradosso ed estradosso della volta, nonché da due superfici elicoidali rette, che combaciano con i conci interni. I cuscinetti frontali sono diversi a seconda che costituiscano l'angolo acuto o ottuso della volta rispetto al piedritto, negli angoli acuti, l'ultimo concio dell'arco di testa, essendo un concio con angoli particolarmente acuti, viene inglobato al cuscinetto d'imposta, mentre nell'angolo ottuso l'ultimo concio è lasciato indipendente. Infine va notato che è preferibile, ai fini di un corretto posizionamento del paramento con l'apparecchio murario, che i conci d'imposta abbiano le superfici esterne perpendicolari ai piani della facciata (fig. 6.23).

La ricostruzione geometrica dell'apparecchiatura elicoidale è stata sviluppata, passo dopo passo, a partire dalla conformazione del paramento interno dalle volta, ricavato da una porzione di cilindro circolare retto sezionato da due piani obliqui paralleli, e proseguendo con lo sviluppo delle eliche cilindriche su di esso; dopo di che, si è passati alla costruzione degli elicoidi retti per l'individuazione delle superfici dei giunti, a questo punto tutti i conci della volta risultano definiti, eccetto quelli d'imposta a cui è stato aggiunto il volume prismatico per formare il cuscinetto d'appoggio.

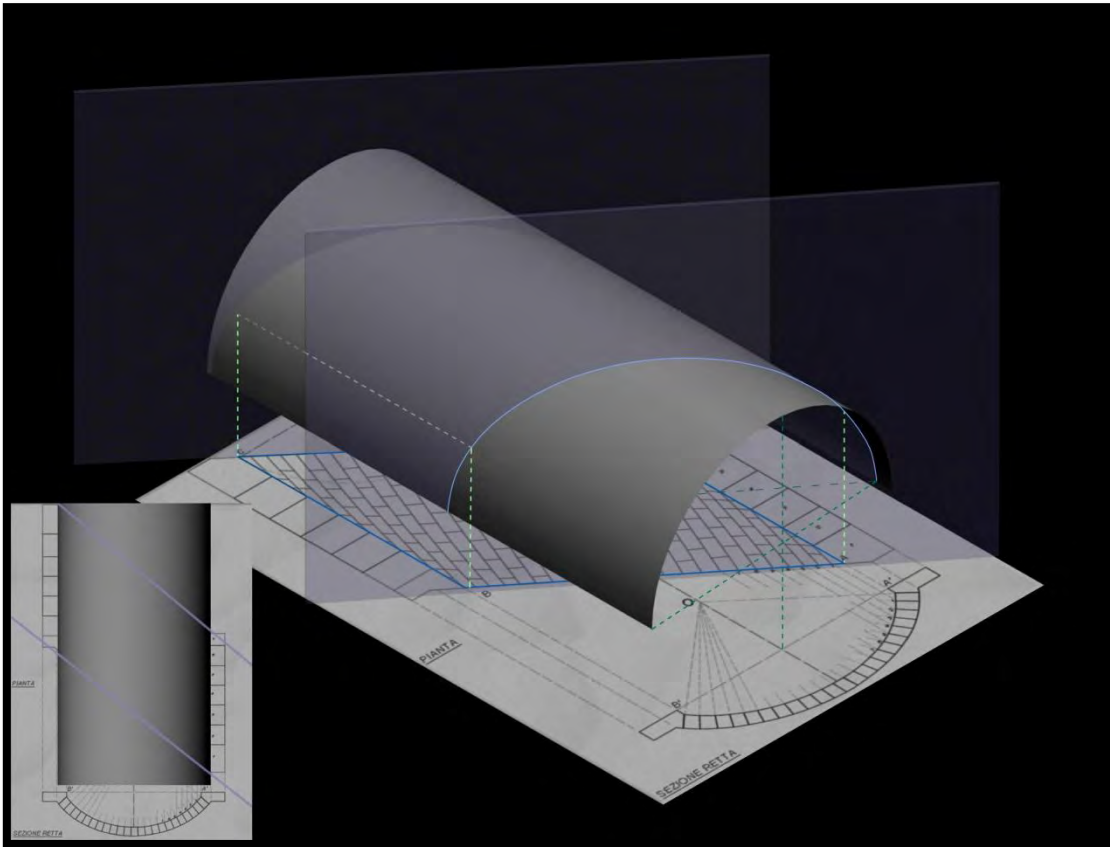


Fig. 6.13. *Porzione di cilindro circolare retto sezionato da due piani obliqui paralleli.*

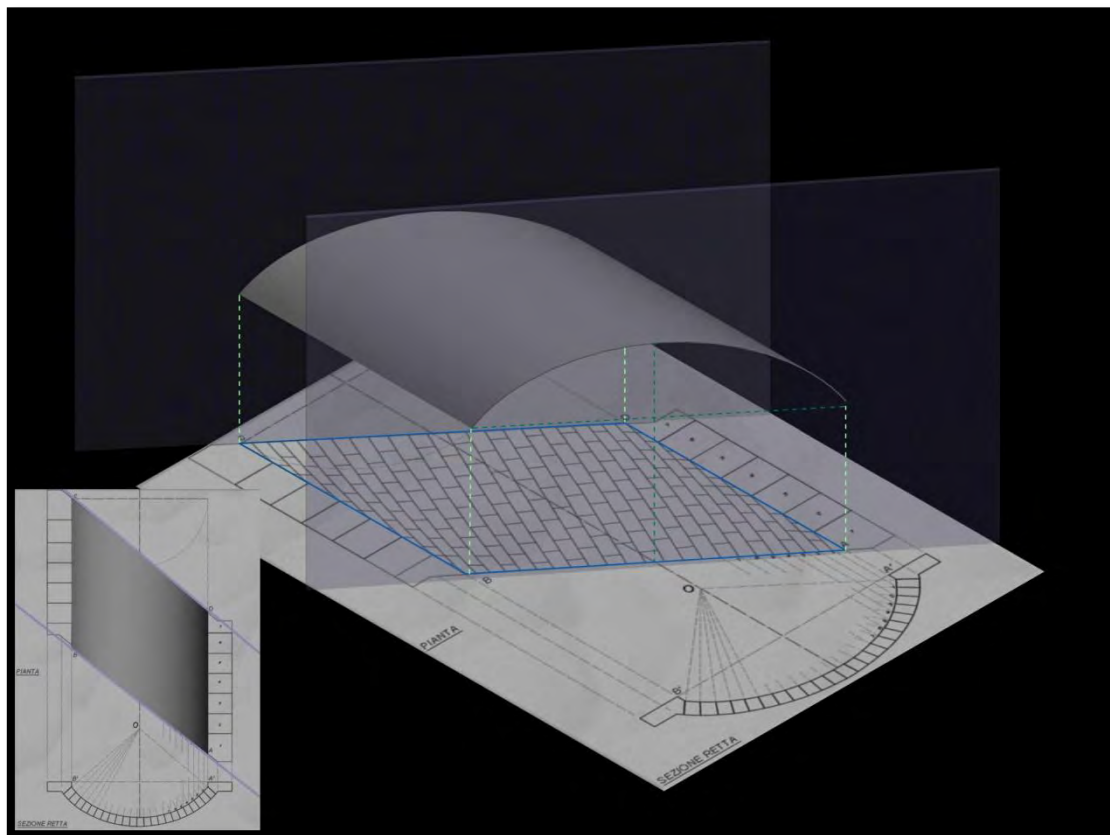


Fig. 6.14. *Superficie cilindrica - Paramento interno della volta obliqua.*

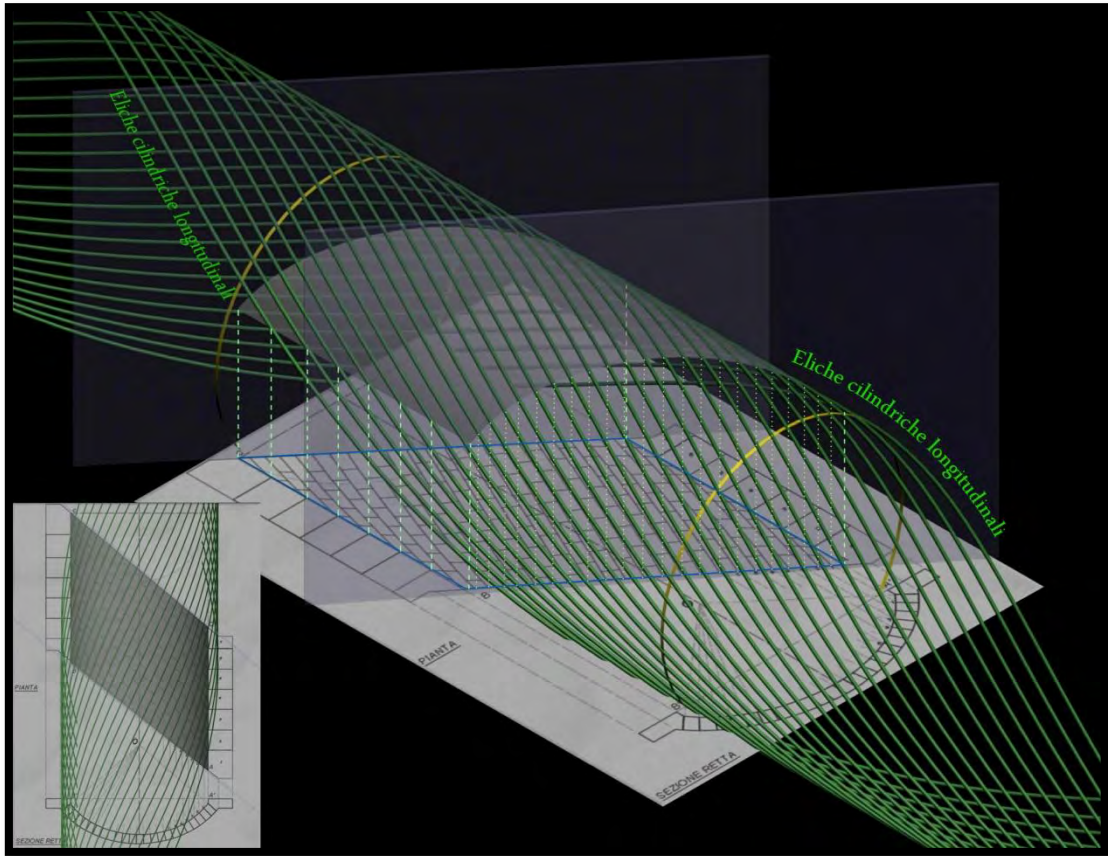


Fig. 6.15. Traccia delle eliche cilindriche longitudinali (giunti continui) sulla superficie cilindrica.

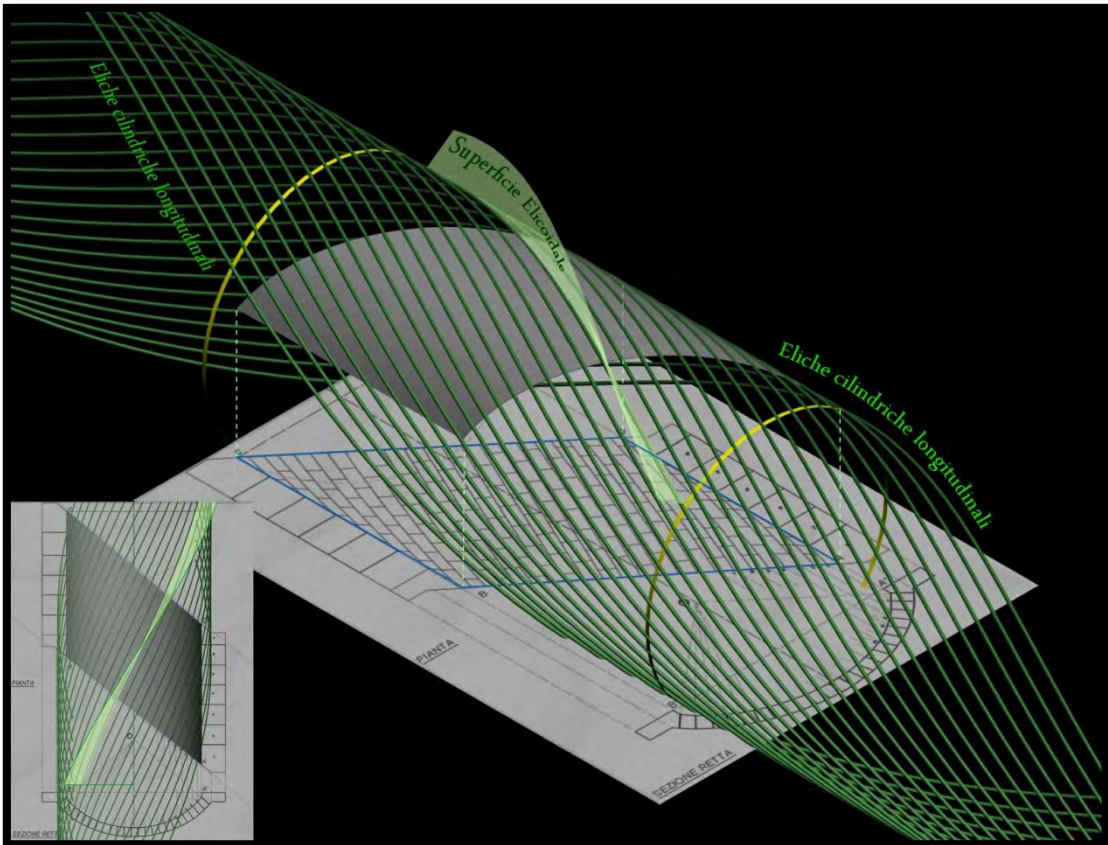


Fig. 6.16. Elicoide circolare retto longitudinale – Superfici giunti continui.

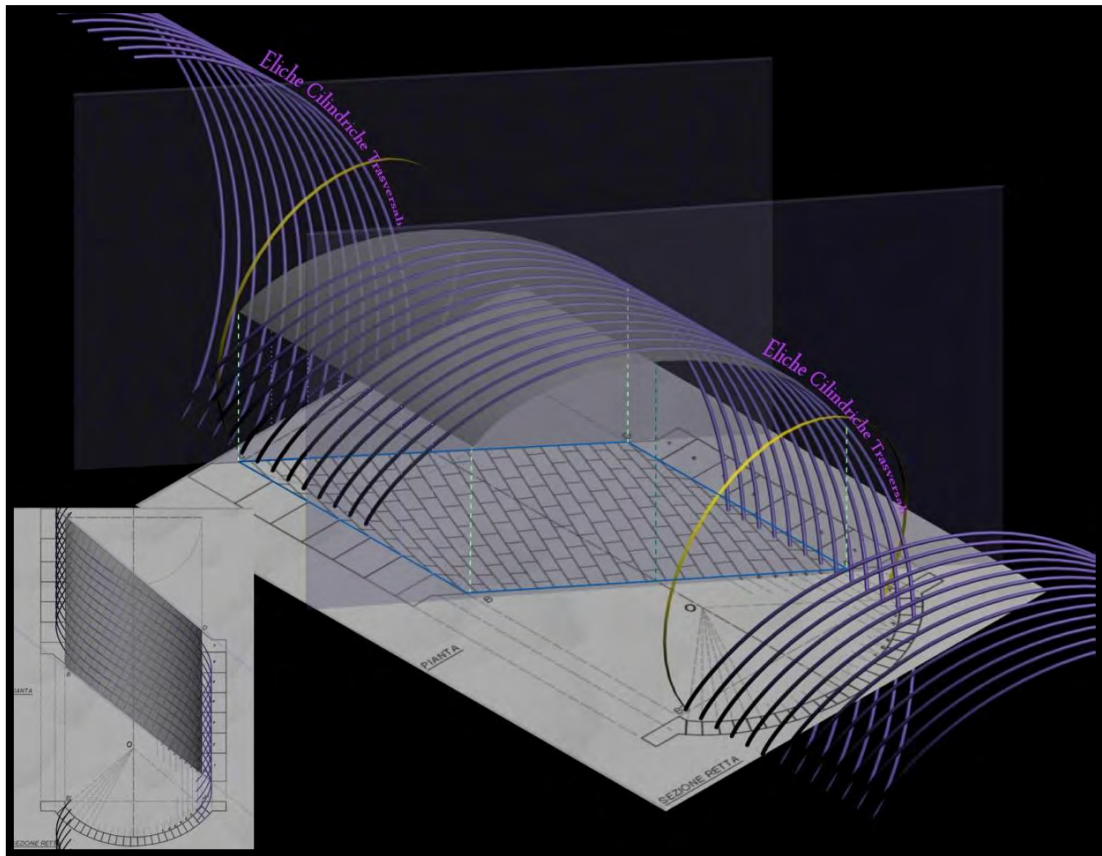


Fig. 6.17. Traccia delle eliche cilindriche trasversali (giunti discontinui) sulla superficie cilindrica.

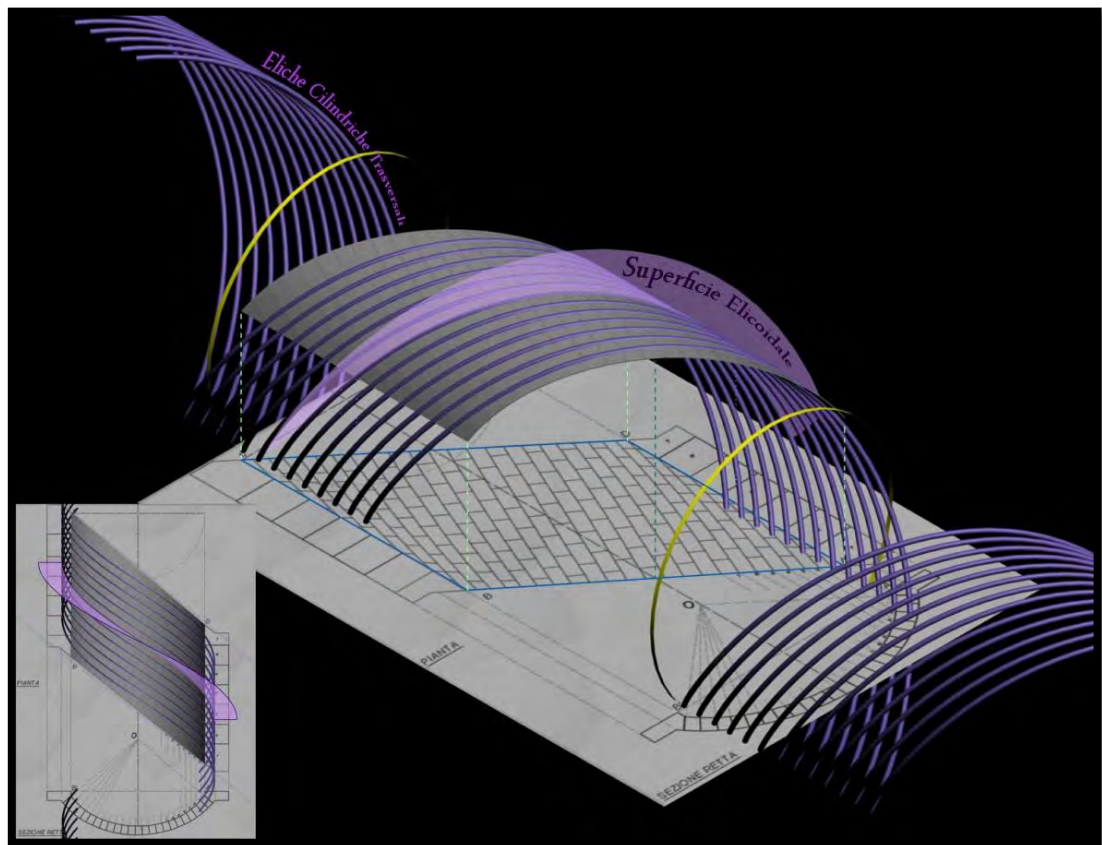


Fig. 6.18. Elicoide circolare retto – Superfici giunti discontinui.

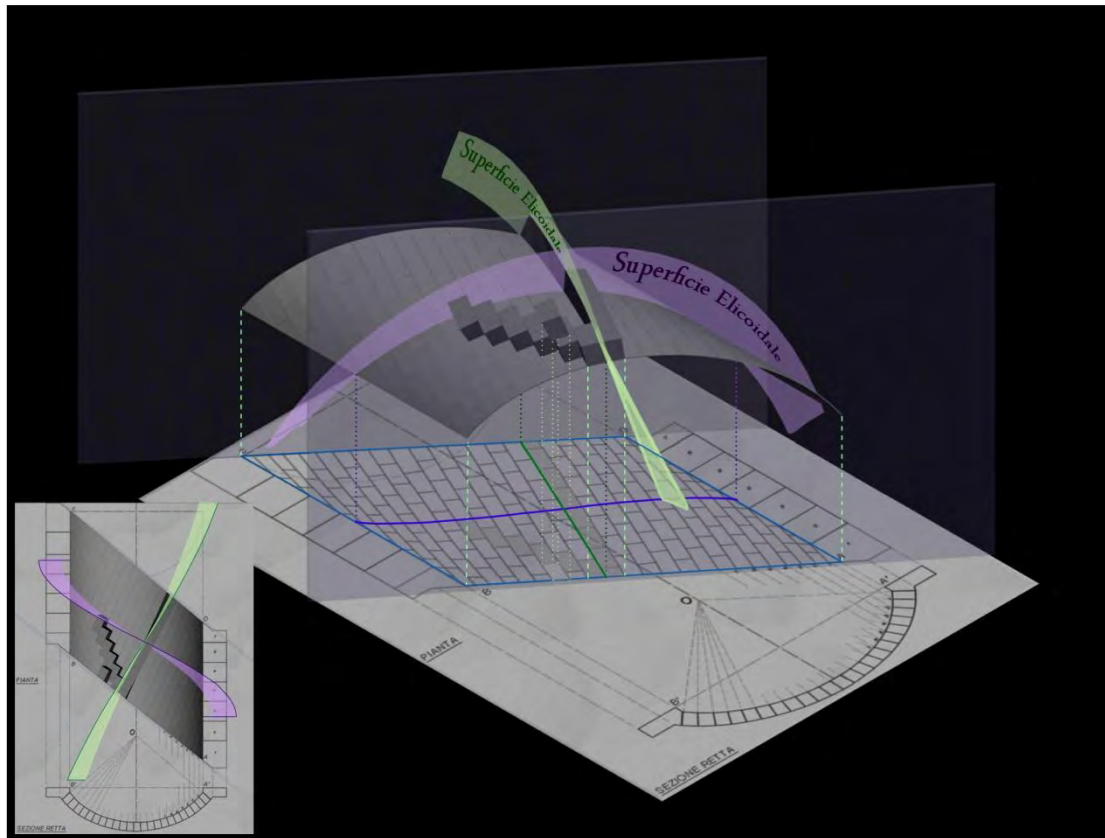


Fig. 6.19. Posizionamento dei conci – letti di posa continui e discontinui.

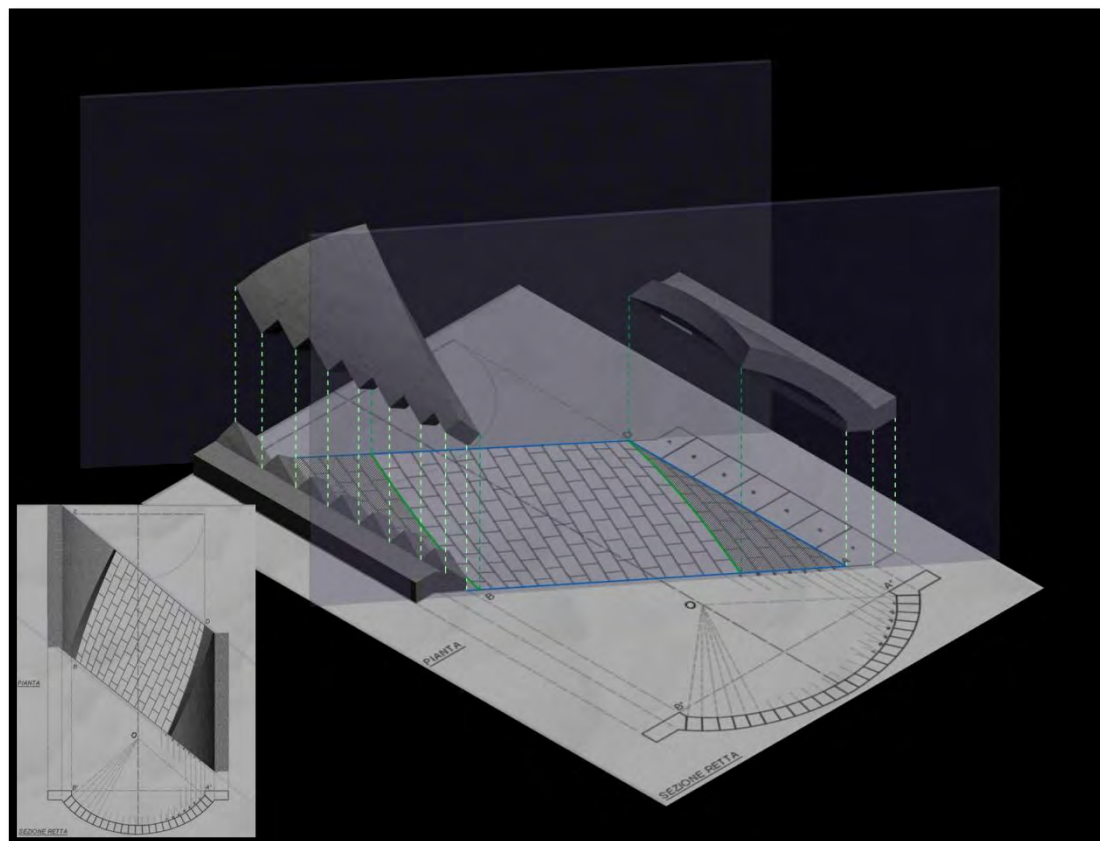


Fig. 6.20. Posizionamento dei filari iniziali e dei conci d'imposta.

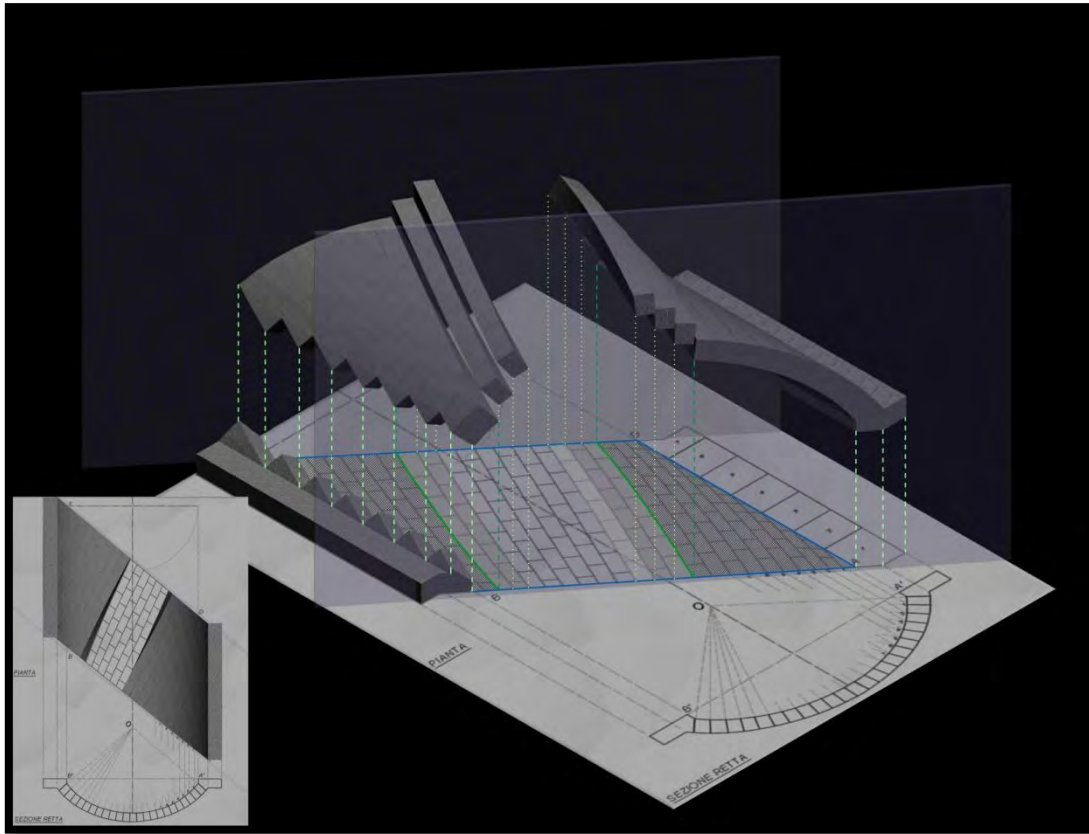


Fig. 6.21. *Posizionamento dei filari – Letti di posa continui.*

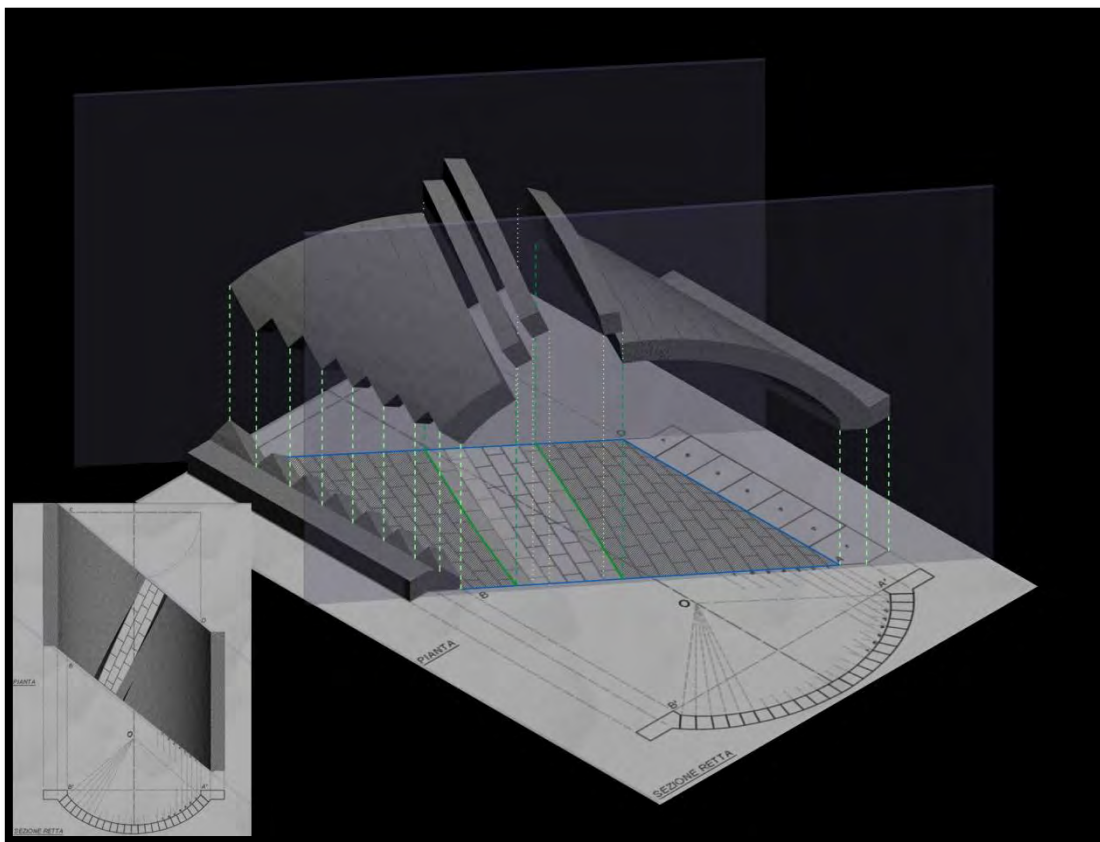


Fig. 6.22. *Posizionamento degli ultimi filari – Letti di posa discontinui.*

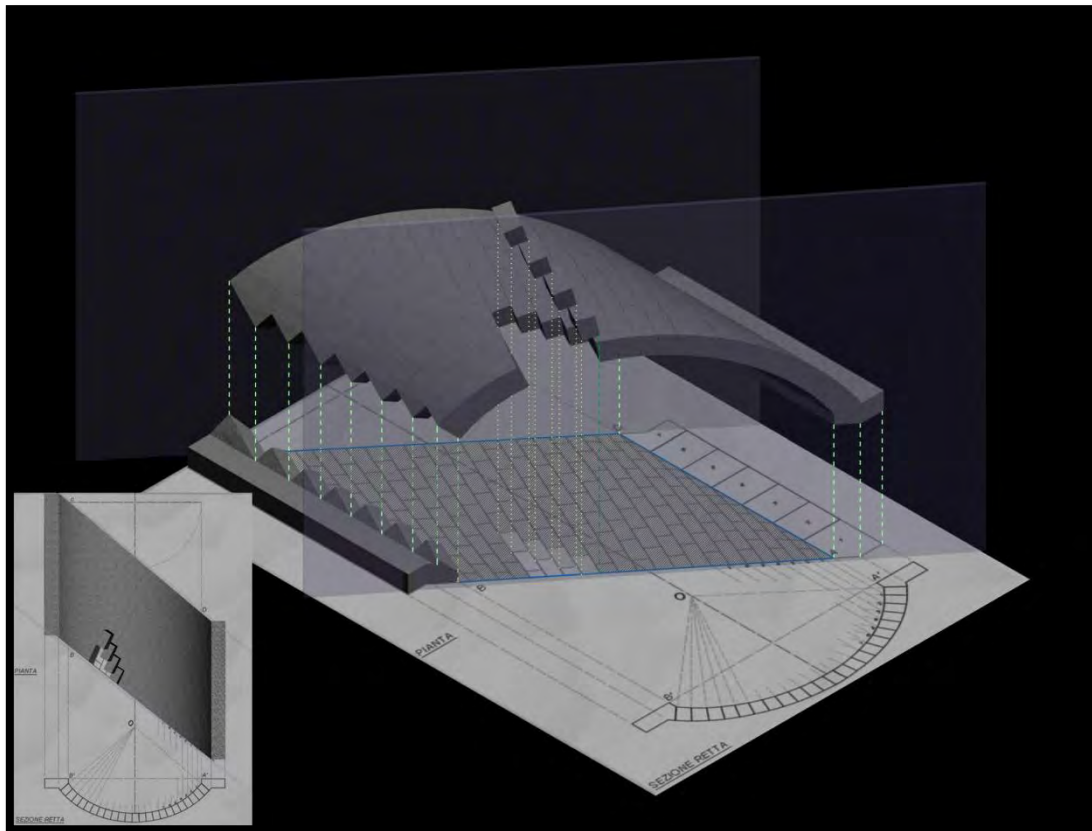


Fig. 6.23. *Apparecchiatura elicoidale completa – Viste dei tre tipi di conci.*

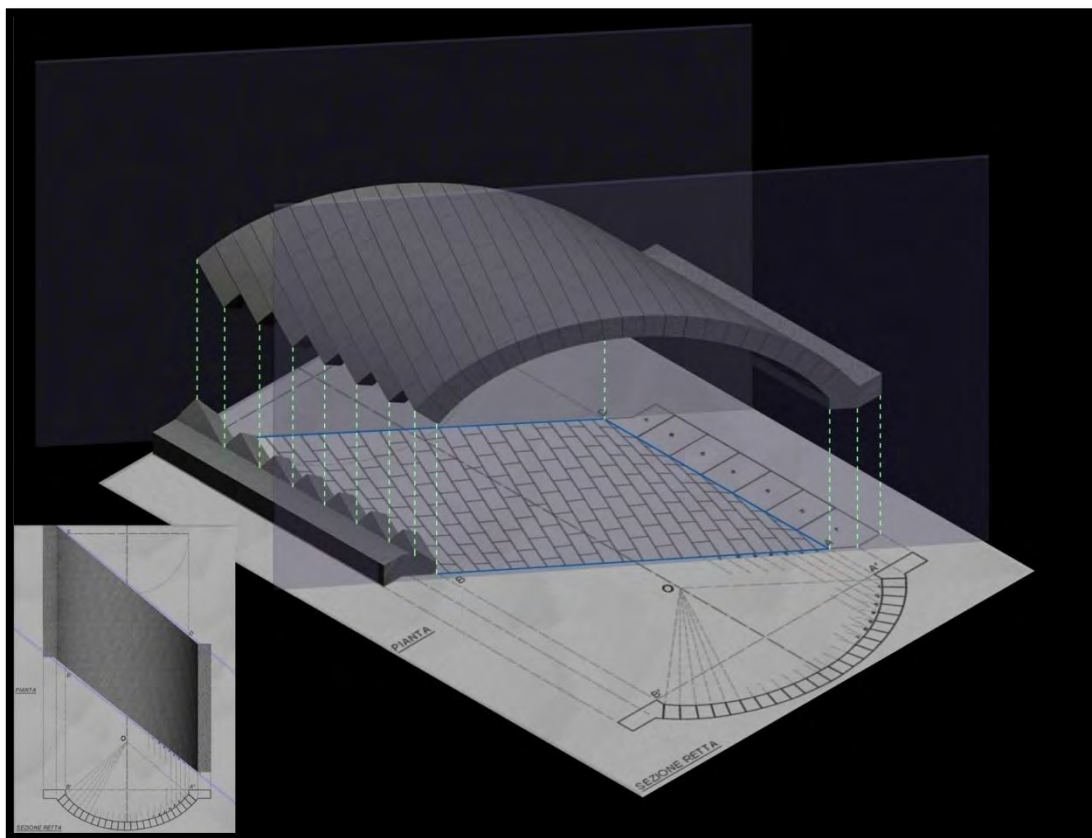


Fig. 6.24. *Apparecchiatura elicoidale completa.*

7. IL METODO DELLA FOTOMODELLAZIONE ARCHITETTONICA

7.1. Introduzione

Partendo dal presupposto che, acquisire delle informazioni sullo spazio fisico è un'esigenza specifica delle discipline che si occupano della conservazione e valorizzazione del patrimonio architettonico, la fotografia appare come un ottimo strumento per la registrazione del reale, un supporto eccezionale per l'analisi delle superfici e l'interpretazione della forma, anche se non sempre utilizzabile per misurazioni e restituzioni degli elementi architettonici.

Le nuove tecnologie offrono al mondo culturale la possibilità di creare e di condividere le conoscenze e la digitalizzazione del patrimonio contribuisce allo sviluppo della società dell'informazione oltre che alla democratizzazione dell'accesso alla cultura. In questo contesto, il modello digitale 3D si afferma come un supporto efficace per documentare lo stato attuale di edifici storici, per fornire risorse ai ricercatori che ne studiano l'evoluzione, oltre che per elaborare dei supporti di diffusione e di valorizzazione destinati alla divulgazione.

Grazie all'informatica l'acquisizione, il trattamento e la resa di informazioni dimensionali hanno conosciuto, in questi ultimi anni, un progresso significativo, gli strumenti e le tecniche di rilievo e rappresentazione attuali danno accesso a risultati fino ad oggi inimmaginabili in termini di precisione, di velocità, esaustività e realismo.

7.2. Dalla Fotogrammetria alla Fotomodellazione

Le tecniche di *restituzione fotogrammetrica*, basate sulla corrispondenza geometrica tra due immagini di uno stesso oggetto come ad esempio una proiezione prospettica e una ortografia, hanno permesso nel corso degli ultimi decenni, la nascita di una stretta relazione tra lo spazio della fotografia e quello della rappresentazione architettonica. Oggi, grazie al progresso delle tecnologie informatiche, della modellazione geometrica e della visione computazionale, questa relazione acquisisce un ruolo fondamentale: lo spazio della rappresentazione diventa tridimensionale e la fotografia incarna una delle possibili viste di questo spazio⁶⁰.

⁶⁰ DE LUCA, L., *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2011, p. 20.

La *fotomodellazione* è una tecnica che conduce a una ricostruzione bi-tridimensionale di un oggetto reale, facendo esclusivamente riferimento all'utilizzo di fotografie, e consiste essenzialmente nell'estrazione dalle fotografie di tutte le informazioni necessarie alle seguenti fasi:

- *coordinate, distanze e punti caratteristici* per la restituzione bidimensionale (2D) di piante e prospetti;
- *vertici e profili* per la ricostruzione tridimensionale (3D) degli elementi architettonici;
- *texture* per il completamento visivo degli elementi.

Si ha quindi la possibilità, a partire da semplici fotografie, di arrivare ad elaborare delle rappresentazioni molto realistiche dove le texture, a seconda della qualità della fotografia, possono essere usate come archivio di informazioni relativo allo stato di conservazione del manufatto.

E' evidente che l'applicazione della fotomodellazione alla ricostruzione 3D degli edifici parte dalla comprensione dei principi geometrici della prospettiva, che permettono di poter misurare, modellare e restituire in tre dimensioni un oggetto reale a partire da un'immagine, intesa come proiezione conica sezionata di una scena (spazio in tre dimensioni) su di un piano (spazio in due dimensioni).

Il primo studioso che riuscì ad individuare le potenzialità della fotografia per l'estrazione di informazioni a carattere spaziale, fu Aimé Laussedat (1819-1907), ingegnere dell'*Ecole Polytechnique* di Parigi che, partendo dagli studi di Leonardo da Vinci (1452-1519) sulla camera oscura e le tecniche che portano all'invenzione della fotografia.

Nel 1839 ad opera di Joseph Nicéphore Niépce (1765-1833), Louis Jaques Mandé Daguerre (1787-1851) e William Henry Fox Talbot(1800-1877), chiama il suo metodo *Metrofotografia*, individuando le prime basi teoriche della fotogrammetria. L'idea che sta alla base di questa disciplina è di semplice comprensione: partendo dal presupposto, secondo cui su di una fotografia la scena tridimensionale è proiettata in prospettiva su un piano bidimensionale, un qualsiasi punto della scena sarà sempre e comunque posizionato lungo il raggio che, partendo dal centro ottico della macchina fotografica, si prolunga all'infinito. Se lo stesso oggetto è visibile in due fotografie distinte, questo punto si troverà sull'intersezione dei due raggi corrispondenti. Questo procedimento, detto *trilaterazione*, permette, partendo da due foto, di posizione e orientamento conosciuti, di ritrovare un qualsiasi punto nello spazio a condizione che sia visibile in entrambe le fotografie.

A partire da questi principi, il vero progresso in fotogrammetria si ha all'inizio del XX secolo con il metodo messo a punto dal professore francese Jean Pierre Saint-Aubin (Ivor Coast 1939), intitolato *le mariage mécanique de la photogrammétrie et de la stéréoscopie*⁶¹, e con la costruzione del primo *restitutore analogico*, per mano di Edoardo von Orel (1877-1941), che permette di determinare la

⁶¹ SAINT AUBIN, J. P., *Le révelé et la représentation de l'architecture*, Inventair Général E.L.P., Parigi 1992.

dimensione e la forma di un oggetto fotografato due volte grazie alla loro osservazione stereoscopica.

Da poco più di vent'anni la fotogrammetria è stata travolta, come tutti gli strumenti di misurazione, dalla rivoluzione elettronica e digitale e ha conosciuto una portentosa evoluzione; questa disciplina viene oggi utilizzata per "rappresentare" le immagini al computer, permette cioè di dedurre, a partire dalle immagini, la struttura geometrica tridimensionale della scena fotografata, basandosi sulle relazioni tra gli oggetti reali e le loro proiezioni piane e sfruttando la rotazione a trecentosessanta gradi della camera.

Nel 2010 Paul Debevec (1953), ricercatore di *computer graphics* presso l'*University of Southern California's Institute for Creative Technologies*, applica il metodo fotogrammetrico alla rappresentazione di oggetti architettonici dimostrando come ben si prestassero alla fotomodellazione⁶², per via della loro geometria, di solito "chiara"; tuttavia le problematiche legate al rilievo architettonico restano ancora irrisolte: riuscire ad estrarre dalle fotografie le informazioni capaci di descrivere le forme architettoniche in funzione dei codici grafici graditi ai professionisti.

7.3. La Fotomodellazione applicata all'Architettura

L'integrazione dei principi fotogrammetrici con il campo computazionale ha gettato le basi per una nuova tecnica, detta *Image-Based Modeling and Rendering*⁶³, da qui deriva il termine *Fotomodellazione*, per la modellazione e la resa degli oggetti architettonici a partire dalle immagini, in cui la relazione tra oggetto reale e la sua immagine si arricchisce di una nuova dimensione, rappresentata dalla possibilità di proiettare sulla geometria ricostruita la sua texture, direttamente estratta dalle fotografie ad alta risoluzione.

Partendo dalla ripresa fotografica, il controllo della *fotomodellazione* permette di ottenere misure, piante, prospetti, sezioni e ortografie per la documentazione metrica dell'edificio e l'analisi del suo stato di conservazione, nonché ricostruzioni tridimensionali dei volumi e degli elementi di dettaglio per una rappresentazione esaustiva nello spazio dei caratteri architettonici, utile ai *fotomontaggi* e ai *fotoinserti* per la valutazione dell'impatto ambientale di una nuova costruzione.

Cinque approcci differenti costituiscono le principali applicazioni della *fotomodellazione architettonica*:

- l'estrazione di dati dimensionali tramite una strategia che mira a isolare una serie di coordinate spaziali per estrarre in seguito le distanze reciproche;

⁶² DEVEVEC, P., MALIK, J., *Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A hybrid Geometry of Image-Based-Approach*, Proceedings of SIGGRAPH, USA California 1996.

⁶³ Processo automatizzato per la creazione al computer di *modelli tridimensionali iper-realistici* e navigabili a partire dall'elaborazione di immagini.

- l'elaborazione di rappresentazioni bidimensionali quali piante e prospetti;
- la ricostruzione geometrica tridimensionale dell'oggetto, procedura questa che richiede un elevato numero di punti omologhi e un'elaborazione più laboriosa dei dati;
- la restituzione dell'apparenza visiva delle superfici attraverso l'applicazione di texture;
- la restituzione programmatica di più aspetti alla volta basata sull'adozione di una strategia di rilievo esaustivo capace di supportare diversi trattamenti.

Si veda l'appendice per la fasi operative della fotogrammetria.

7.4. La Calibrazione e l'Orientamento delle camere

L'operazione di calibrazione e orientamento delle camere è la fase più delicata di tutto il processo di fotomodellazione, da essa dipendono la precisione metrica e la coerenza geometrica delle restituzioni dell'oggetto rilevato. Questa procedura è basata sui principi che permettono di determinare la geometria di una scena a partire dallo studio delle relazioni esistenti tra due o più fotografie in funzione delle tecniche di ripresa adoperate.

Il primo passo consiste nella creazione di un *modello geometrico di camera* che rappresenti nella scena la macchina da presa, ciò permetterà di calcolare per ogni punto della scena (coordinate x,y,z nello spazio) in quale posizione (coordinate u,v nella foto) questo punto sarà proiettato sul piano di immagine della camera (fig. 7.1). Per far ciò, bisogna conoscere la matrice di proiezione della camera che è definita da due gruppi di informazioni distinte: *parametri estrinseci* (posizione e orientamento) e *parametri intrinseci* (distanza principale, coordinate del punto principale e distorsione) che determinano il tragitto di un raggio luminoso che colpisce l'oggetto fotografato e raggiunge dopo essere stato riflesso/rifratto l'obbiettivo della camera.

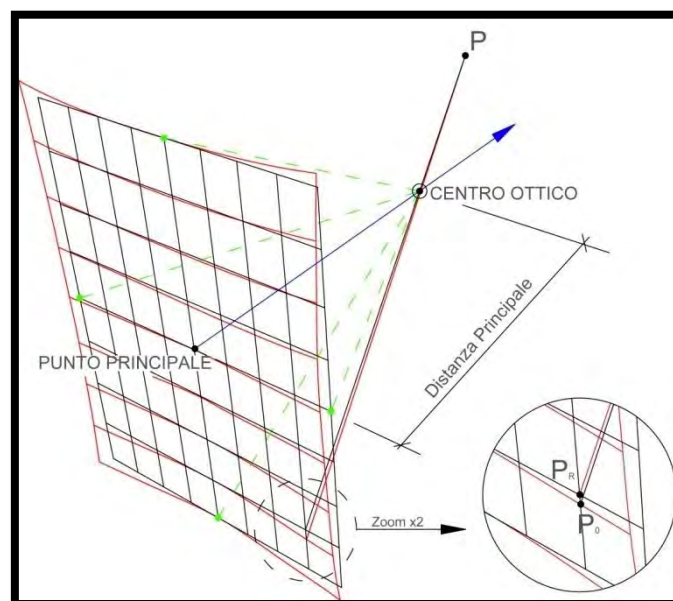


Fig. 7.1. Modello geometrico di una camera.

Il metodo utilizzato per il calcolo dei parametri che definiscono la geometria interna della camera, detto *resezione spaziale*, consiste nell'accoppiamento di due o più punti omologhi selezionati su foto diverse (*accoppiamento 2D/2D*). Senza alcun riferimento metrico sulla scena, pur non potendo stimare la posizione di un punto P su di essa, è possibile comunque tracciare la semiretta R_{p_1} che, partendo dal centro ottico C_1 , passa dal punto p_1 sull'immagine e si proietta all'infinito.

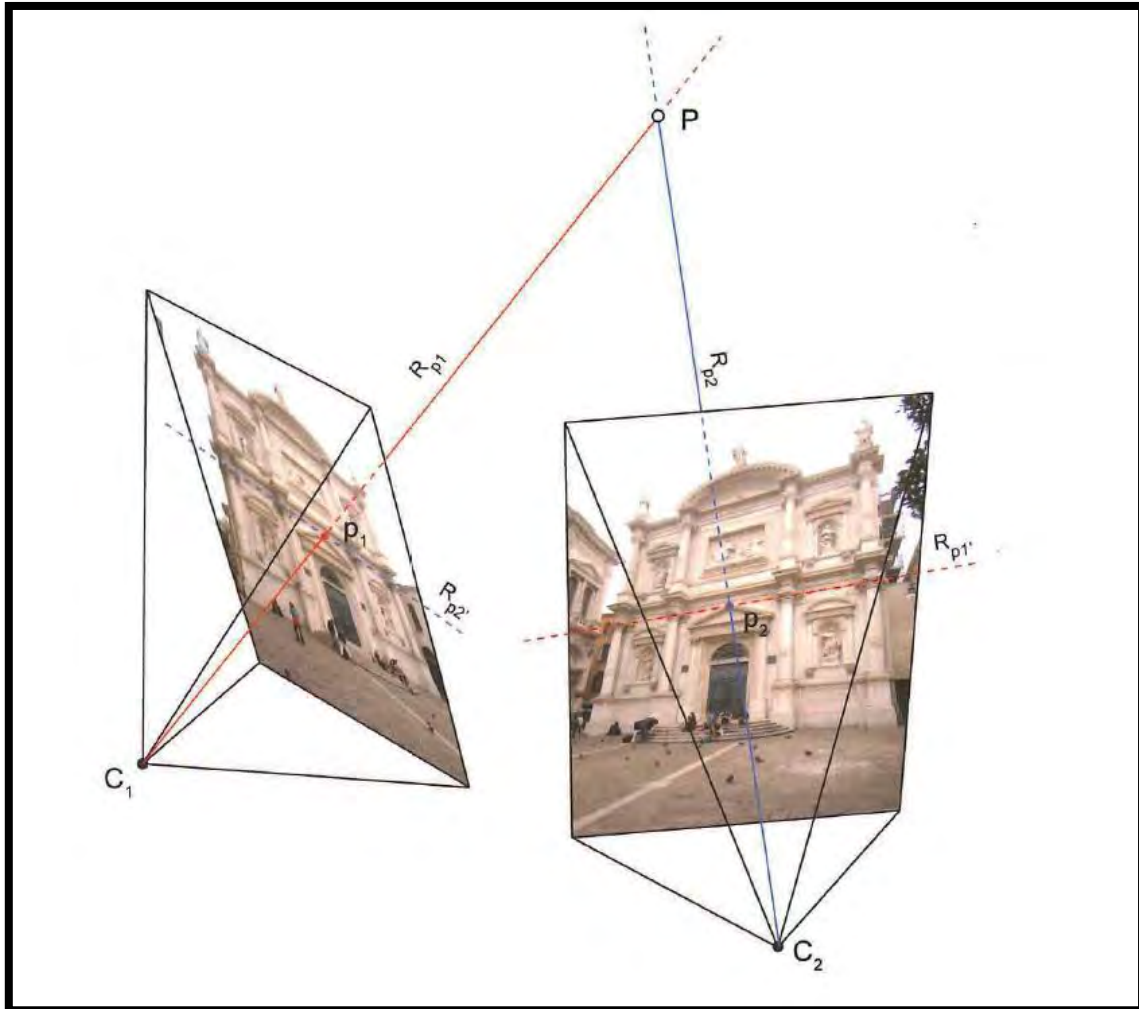


Fig. 7.2. Definizione di un punto nello spazio tramite l'intersezione di due semirette partenti dai centri ottici e passanti per i punti omologhi di due immagini. (Fonte: DE LUCA, L., 2011)

La sola informazione nota rispetto alla posizione di P nello spazio è quella riguardante la sua appartenenza alla semiretta R_{p_1} , resta invece sconosciuta la sua distanza dal centro ottico. Procedendo allo stesso modo con la seconda immagine di centro ottico C_2 , vedremo che la sua proiezione R_{p_2} passerà certamente per il punto omologo. La posizione del punto P nello spazio risulterà dall'intersezione delle due semirette R_{p_1} e R_{p_2} , uscenti rispettivamente dai centri ottici C_1 e C_2 e passanti dai punti omologhi p_1 e p_2 (fig.7.2)⁶⁴.

⁶⁴ DE LUCA, L., *La fotomodellazione architettonica. Rilevo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2011, p. 77.

L'accoppiamento dei punti omologhi è un'operazione svolta dal calcolatore, ma è in questa fase che il *software* stima il modello geometrico della scena a partire da quello della camera. I punti scelti devono essere *vertici caratteristici*, tratti dalle discontinuità della forma dell'oggetto, in base agli aspetti geometrici e alla loro collocazione nell'immagine. La distribuzione dei punti omologhi nell'immagine è un aspetto che condiziona fortemente la precisione del modello: è preferibile che questi punti coprano la massima estensione dell'immagine e siano distribuiti su diversi piani nello spazio (in più direzioni) cercando di coprire tutta la profondità della scena.

La valutazione della qualità metrica, ottenuta con il processo di calibrazione, può essere verificata attraverso il confronto tra distanze misurate a priori nella scena e misurazioni nel modello restituito. Questa verifica deve tener conto degli errori intrinseci al dispositivo di misura: risoluzione della macchina fotografica, incertezza in fase di accoppiamento dei punti e compensazione di valori in fase di calibrazione.

7.5. La Restituzione geometrica bidimensionale

Se ad una fotografia si associano informazioni di carattere metrico, essa diventa un ottimo supporto per la misurazione, disponibile in ogni momento e per diversi tipi di analisi. Attraverso la *fotomodellazione* è possibile trasformare l'ambiente fotografato in ambiente di misura. Alla fine della fase di calibrazione e orientamento della camera non si ha nessuna relazione metrica con l'oggetto, è quindi necessario configurare l'orientamento generale della scena, attraverso un sistema di riferimento, e successivamente mettere in scala i dati rilevati utilizzando una o più distanze di riferimento prese sul campo. Una volta definiti il sistema di riferimento e le misure di riferimento, la posizione di ogni punto estratto a partire dalla fotografia sarà espressa tramite una traslazione lungo i tre assi a partire dall'origine. La conoscenza dell'esatta posizione di ogni punto nello spazio, tramite la calibrazione delle camere e l'accoppiamento dei punti omologhi, fornisce delle informazioni preziosissime per l'elaborazione di una rappresentazione secondo i metodi convenzionali perché permette di poterli proiettare su un piano bidimensionale.

L'operazione più frequentemente utilizzata per la presa di misure sulle fotografie è il *raddrizzamento fotografico*, una tecnica che consiste in una trasformazione geometrica che converte una proiezione prospettica in una proiezione ortogonale, conferendo alla fotografia una scala metrica reale che necessita solo di essere scalata riferendosi a misurazioni dirette. Questa procedura poggia sull'ipotesi di continuità del modello, le discontinuità del rilievo non sono conteggiate: per risolvere questo problema è necessario dunque raddrizzare la fotografia su più piani situati a differenti livelli di profondità (fig. 7.3).

Queste molteplici proiezioni generano delle *immagini omotetiche*, ovvero immagini che hanno in comune lo stesso centro di presa e il rapporto scalare. Ciò permette di poter separare, nella serie di

immagini prodotte, gli elementi appartenenti a diverse proiezioni, per poi sovrapporle in un unico livello, al fine di generare un'immagine finale che rappresenta l'insieme degli elementi proiettati in maniera ortogonale rispetto al piano di raddrizzamento, detta *ortofotografia* (fig. 7.4).

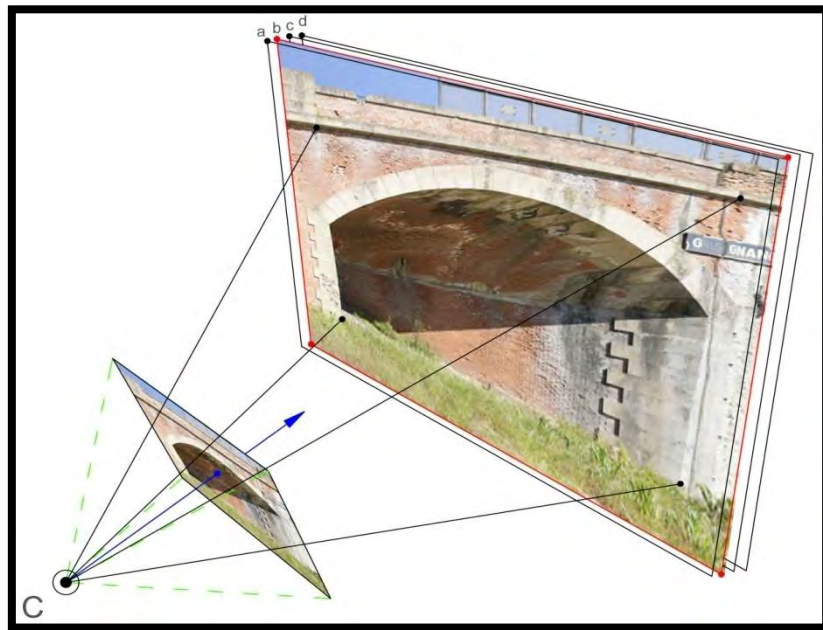


Fig. 7.3. Raddrizzamento a diversi livelli di profondità.

Questo tipo di restituzione, anche se laboriosa, garantisce una proiezione corretta di tutti gli elementi in facciata su una proiezione ortografica, evitando l'insorgere di quelle ambiguità spesso difficilmente interpretabili in fase di disegno⁶⁵.



Fig. 7.4. Ortofotografia.

⁶⁵ DE LUCA, L., *La fotomodellazione architettonica. Rilevo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2011, p. 120.

7.6. La Restituzione geometrica dal modello tridimensionale

La *modellazione geometrica 3D* prevede la definizione della posizione nello spazio di ogni punto caratterizzante la forma da ricostruire e obbliga a prendere in considerazione il modo secondo il quale questi punti sono connessi da entità geometriche più o meno complesse (linee, curva, superfici, volumi). La caratterizzazione di queste entità è un aspetto molto importante per la restituzione, soprattutto per gli oggetti architettonici.

In questi casi le capacità di osservazione e la comprensione della natura geometrica delle opere architettoniche da parte dell'operatore gioca un ruolo fondamentale, si tratta di un processo cognitivo basato sulla relazione tra due aspetti: da un lato, la comprensione delle relazioni esistenti tra le differenti parti della forma; dall'altro, la conoscenza delle nozioni proprie ai differenti tipi di rappresentazione geometrica. Questa doppia visione del problema fa sì che il momento di ricostruzione geometrica diventi momento di analisi basato sulle conoscenze architettoniche. L'analisi geometrica di un edificio si basa sull'identificazione di tutte le informazioni necessarie a descriverne la forma, sulla scelta della strategia più idonea alla loro definizione e della tecnica più efficace per la restituzione. Per conoscere la forma bisogna rilevarla, e per rilevarla bisogna decifrarne la natura geometrica. Come detto, la *fotomodellazione architettonica* pone la sua attenzione a ricostruzioni geometriche a partire da punti di controllo (*nuvole di punti* omologhi individuati su un numero considerevole di immagini attraverso il procedimento di calibrazione e orientamento delle camere); le tecniche di ricostruzione delle geometrie a partire da nuvole di punti si possono riassumere in tre grandi famiglie:

- *la rappresentazione filare* – descrive gli oggetti tramite dei vertici e dei lati connessi, ma non contiene informazioni su superfici e volumi;
- *la rappresentazione parametrica* – descrive gli oggetti tramite un insieme di superfici, ma non definisce il volume;
- *la rappresentazione volumetrica* – descrive gli oggetti rilegando gli elementi delle sue frontiere (dai vertici fino al volume).

Inoltre, un elemento già modellato può anche essere trasformato attraverso le operazioni geometriche di *traslazione*, *rotazione* e *omotetia*, che permettono di controllare rispettivamente la posizione, l'orientamento e la dimensione dalle relazioni che intercorrono tra un sistema di riferimento fisso e uno solidale all'oggetto da trasformare.

In funzione della complessità morfologica dell'edificio è quindi possibile combinare diversi tipi di rappresentazione e diverse tecniche di ricostruzione che permettono di definire e/o approssimare la forma geometrica di qualsiasi oggetto; in appendice verranno illustrate le tecniche di ricostruzione tridimensionale più usate nella fotomodellazione architettonica.

7.7. Potenzialità e limiti della Fotomodellazione

Dall'analisi condotta sul metodo della fotomodellazione si può intendere la fotografia come un eccezionale strumento per la *registrazione del reale*. Da questo punto di vista, la quantità di informazioni che è possibile registrare in una singola campagna di rilievo fotografico, se ben condotto e con un'esigua quantità di rilevazioni metriche, è veramente enorme.

Terminata la procedura di calibrazione delle camere, ogni singolo *pixel* di una fotografia può essere trasformato in una corrispondente coordinata su uno spazio 3D fedelmente misurabile; malgrado ciò, l'estrazione di queste coordinate, pur essendo un'operazione automatizzata, resta un'operazione iterativa e quindi spesso molto lunga. Questo limite, dovuto al fatto che la *fotomodellazione* è una tecnica di rilievo indiretto, è al tempo stesso un vantaggio: la fotografia è un documento che garantisce la possibilità di ricavare delle misure complementari anche in un secondo momento. In effetti l'informazione contenuta nelle fotografie può essere estratta in maniera più o meno dettagliata in funzione della finalità della restituzione e della complessità dell'oggetto da ricostruire. Logicamente è di fondamentale importanza prendere in considerazione la possibilità di associare alla ripresa fotografica il rilievo (anche manuale) di alcuni punti o distanze di riferimento, queste informazioni complementari potranno in seguito essere sfruttate per introdurre un'unità di misura nella scena foto-modellata per definire dei vincoli geometrici in fase di calibrazione e di orientamento della camere e infine per la verifica dei risultati. La qualità della calibrazione e dell'orientamento delle camere - e quindi la misura risultante delle coordinate nello spazio - dipende essenzialmente dalle risoluzioni spaziali dei *pixel* dell'immagine nella scena 3D.

Per quanto riguarda la varietà di informazioni acquisite, è evidente che tutti i dati registrati grazie ad una macchina fotografica presentino le qualità d'eshaustività e di veridicità proprie alla fotografia. Si tratta di informazioni estremamente importanti per la documentazione dello stato di fatto di un edificio, soprattutto per quanto riguarda l'analisi dei materiali e del loro stato di conservazione.

Per quanto concerne la fase di ricostruzione 3D, un limite importante della *fotomodellazione* riguarda la difficoltà nel riprodurre le forme che non presentano delle discontinuità evidenti, per esempio le sculture e i bassorilievi. Questo problema (che a volte è possibile risolvere adottando specifiche soluzioni in fase di ripresa fotografica) è principalmente dovuto alla difficoltà di selezionare sulle fotografie degli insiemi di punti che descrivono la geometria delle superfici continue.

Malgrado questi limiti, il progresso continuo nella produzione di macchine fotografiche digitali (e soprattutto l'aumento incalzante della risoluzione dei captori) permette oggi di considerare la *fotomodellazione* come una soluzione efficace per molteplici applicazioni che riguardano l'analisi e la documentazione grafica tridimensionale delle opere architettoniche.

8. CASO STUDIO: PONTE A *GRISIGNANO DI ZOCCO*

8.1. Cenni storici e Localizzazione dell'opera

Il ponte oggetto di studio si trova sulla linea ferroviaria Milano-Venezia (ex Ostiglia – Treviso) al Km 212+530 da Milano, a pochi metri dalla stazione di Grignano di Zocco, nella frazione di Poiana di Granfion in provincia di Vicenza. Il *cavalca-ferrovia* è stato realizzato agli inizi degli anni '30 nel quadro dei lavori conseguenti all'incrocio dell'*Ostiglia* nel tratto verso Treviso per sostituire il vecchio passaggio a livello sulla allora strada provinciale *SP 11*, odierna *SP 23*, che collega Grignano di Zocco, Poiana e Campodoro. Le informazioni sui dati storico-anagrafici dell'opera sono state reperite dal *web*⁶⁶, anche perché, malgrado i parecchi sforzi, le ricerche dei documenti storici e degli elaborati ufficiali, svolte a svariati livelli (enti Statali Comunali, Provinciali e delle Ferrovie dello Stato), non hanno prodotto alcun risultato. Gli unici documenti storici pervenuti sono una cartografia IGM⁶⁷ del 1939, che dimostra l'esistenza del ponte in quella data; e una Mappa storica del Catasto Impianto di Grignano di Zocco, reperita presso l'Archivio di Stato di Vicenza e aggiornata intorno agli anni '20, quando il ponte ancora non esisteva.

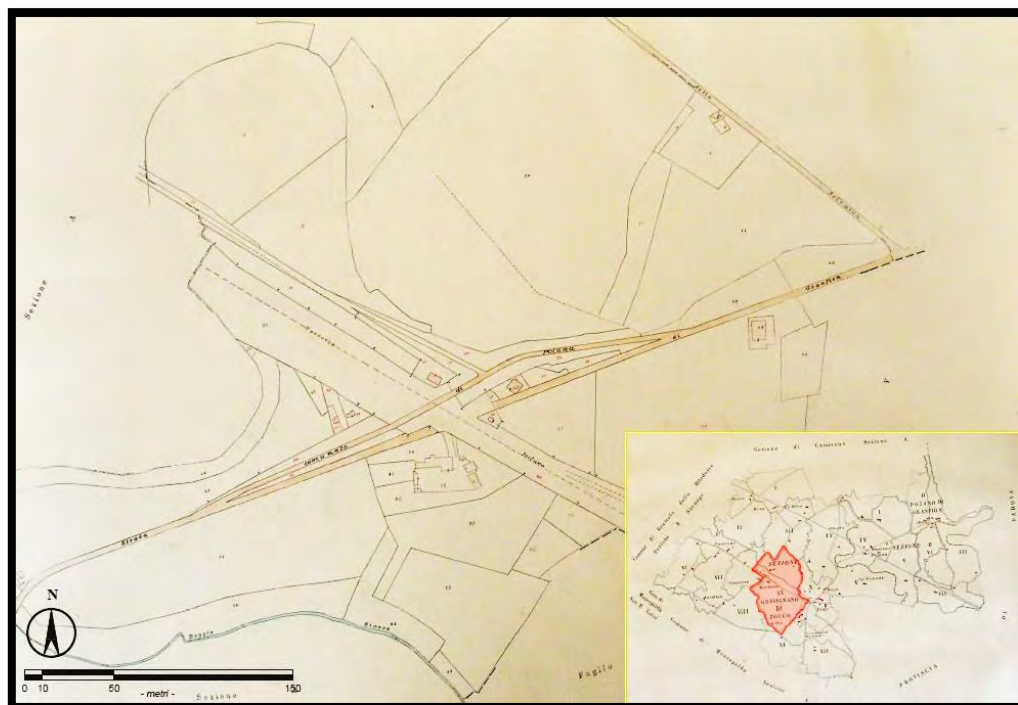


Fig. 8.1. *Mappa di Grignano di Zocco. Catasto Impianto 1920. (Fonte:ARCHIVIO DI STATO DI VICENZA).*

⁶⁶ Sito web: ostigliatreviso.org

⁶⁷ Carta Storica dell'ISTITUTO GEOGRAFICO MILITARE da www.regioneveneto.it

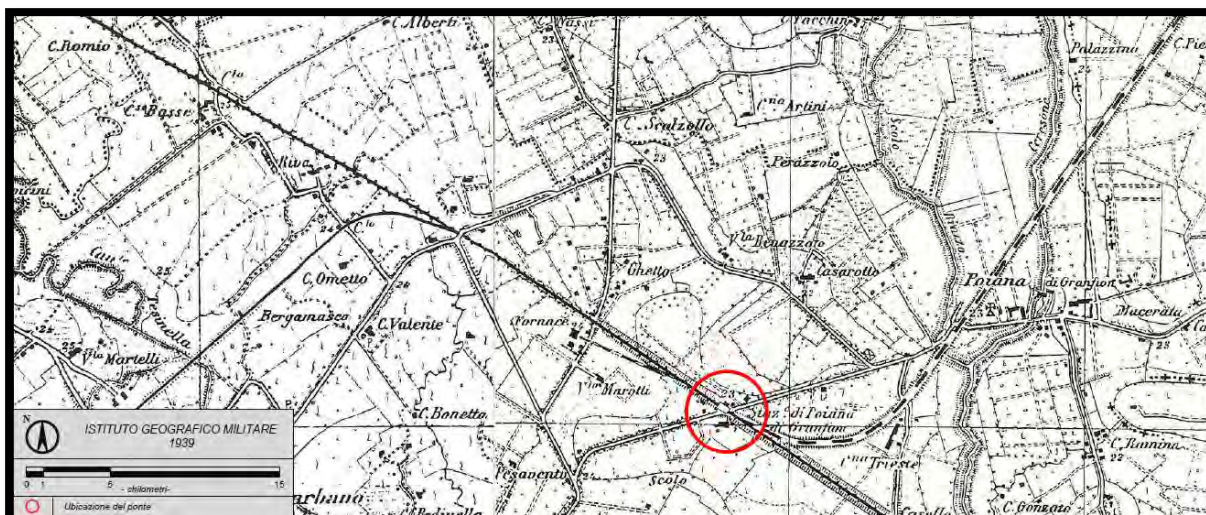


Fig. 8.2. Mappa IGM 1939. (Fonte:WWW.regioneveneto.it).

Come si può vedere nell'IGM del 1939 (fig.8.2), la stazione attuale di Grisignano di Zocco, in origine prendeva nome dal vicino centro abitato di Poiana di Granfion (cambiò poi il suo nome in Grisignano di Zocco solo nel 1936). Essa sorgeva nelle vicinanze della fornace per laterizi *Tretti-Marotti*, costruita nei primi anni del '900 lungo la strada per Camisano, e serviva essenzialmente da scalo merci. Agli inizi del Novecento, subito dopo la fine della prima Guerra Mondiale, a seguito dei lavori per la linea ferroviaria Milano-Venezia, vengono eseguiti, a Grisignano di Zocco, importanti opere di ampliamento della stazione e dello scalo, allo scopo di adeguare la struttura ad un nodo di primaria importanza fra le linee a doppio binario (l'Ostiglia era a binario unico ma tutto il piano di stazione e di innesto con la Milano-Venezia è stato progettato per due binari).

Agli inizi degli anni '30, a seguito di un forte sviluppo della piccola e medio impresa in quella zona, il centro abitato di Grisignano di Zocco si ingrandisce, la precedente stazione viene quindi demolita, il nuovo scalo prevede in più un magazzino, un piano di carico merci, lato Venezia, e di un lungo piano caricatore militare su un binario esterno, a fianco alla nuova stazione. Inoltre viene prevista una deviazione della strada provinciale, funzionale al nuovo cavalca-ferrovia obliquo a 4 luci in mattoni e blocchi di calcestruzzo, studiato nell'ambito di questa tesi per via della particolarissima apparecchiatura elicoidale all'inglese che caratterizza le volte delle sue campate. Sempre a ridosso del ponte ma in direzione opposta, al km 67+864 (progressiva chilometrica dell'Ostiglia), viene costruita una casa cantoniera a quattro alloggi riservata al personale della stazione e ancora presente accanto al ponte.

Il 28 Ottobre 1941 si inaugura l'ultimo tratto di linea collegante Grisignano di Zocco a Treviso. La nuova stazione entra così nel pieno della sua funzionalità proprio nel bel mezzo della seconda guerra mondiale, gestendo il traffico ferroviario, costituito soprattutto dalle tradotte militari lungo le direttrici Milano-Venezia e Ostiglia-Treviso.

L'opera, pur essendo attualmente in uso, si presenta in stato degrado, se non dal punto di vista strutturale, almeno per quanto riguarda la manutenzione ordinaria come attesta la presenza di vegetazione, che copre interamente le spalle del ponte, l'insorgere di evidenti effluorescenze⁶⁸ sull'intradosso delle volte e la presenza di graffiti.



Fig. 8.3. Ortofoto odierna del sito. (Fonte:WWW.regioneveneto.it).

8.2. Le operazioni di rilievo

La campagna di rilievo è stata svolta in relazione al metodo di restituzione che si è scelto di utilizzare: *il rilievo fotogrammetrico*. I dati raccolti consistono quindi prevalentemente in “semplici” fotografie e alcune misurazioni, la precisione degli strumenti utilizzati e la corretta esecuzione delle tecniche di ripresa fotografica stanno alla base della restituzione di un modello che si avvicini il più possibile all'oggetto reale.

Per poter procedere è stata inoltrata una richiesta ufficiale alle *Ferrovie dello Stato* che ci ha permesso, con la supervisione di un addetto per il controllo della sicurezza, di poter lavorare nelle vicinanze del ponte anche se i binari che lo attraversano, nelle due campate centrali, sono rimasti in uso.

Vista la configurazione volumetrica dell'opera da rilevare si è scelto di usare due differenti tecniche di ripresa fotografica: la *ripresa fotografica ad assi convergenti* e la *ripresa fotografica panoramica sferica*.

⁶⁸ EFFLUORESCENZA: *Formazione superficiale di a spetto cristallino, generalmente di colore biancastro, dovuta alla cristallizzazione di sali durante l'evaporazione dell'acqua all' interno del corpo (può presentarsi anche polverulento o filamentoso).* (UNI-EN 111-2000)

La *tecnica di ripresa ad assi convergenti* è stata utilizzata con l'obiettivo di restituire il modello tridimensionale. Al fine di fornire al *software*, in fase di restituzione, le informazioni giuste per una corretta individuazione dei punti omologhi, è stato necessario effettuare un numero elevato di scatti (in totale 556 fotografie) cercando, per quanto possibile, di spostarsi attorno all'obiettivo in modo da incrociare gli assi di ripresa per formare una "stella"; in particolare si è scelto di operare per serie di quattro immagini catturate da posizioni diverse in modo da agevolare la ricerca dei punti omologhi. Inoltre per ogni posizione sono state scattate, con una procedura automatica preimpostata nella macchina, tre foto con diversa esposizione HDR⁶⁹, in modo da bilanciare l'esposizione dell'immagine finale. Le fotografie sono state scattate tramite una macchina fotografica professionale, con un obiettivo da 24 mm, montata su un *treppiedi regolabile* che ha permesso di potersi spostare facilmente da una posizione all'altra, inoltre l'uso di un telecomando a distanza per gli scatti ha ridotto al minimo gli errori da contatto con lo strumento.

La *tecnica di ripresa panoramica sferica* è stata invece utilizzata per la restituzione delle ortofotografie dei prospetti del ponte, ottimo strumento per la misurazione delle sue parti nello spazio bidimensionale. In questo caso la macchina fotografica, con un obiettivo da 50 mm per una maggiore qualità dei dettagli, è stata montata su una *testa panoramica sferica* calibrata in modo da fotografare solo il prospetto del ponte e coprire quindi solo una porzione di sfera (fig. 8.4).



Fig. 8.4. Testa Sferica.

⁶⁹ Sigla di *High Dynamic Range* (*Ampia Gamma Dinamica*), è una tecnica utilizzata in grafica fotografica computerizzata per ottenere un'immagine in cui l'intervallo tra le aree più chiare e quelle più scure sia più ampio dei metodi usuali.

Il processo è interamente automatico e gli scatti vengono catturati durante la rotazione della testa sferica che calcola le sovrapposizioni tra le immagini adiacenti di circa il 33%. In base alla calibrazione iniziale sono stati necessari, per la restituzione di un solo prospetto, 230 scatti per ogni serie di foto sferiche, una per ogni lato del ponte, con una durata di ogni processo di circa 8 min.

Le poche misurazioni *in situ* sono state rilevate manualmente e riportate, come da prassi, nell'eidotipo⁷⁰.

8.3. La restituzione delle ortofotografie

La restituzione delle ortofotografie è stata sviluppata attraverso uno specifico *software* di *image-stitching* (*Kolor Autopano Giga*) che permette di elaborare immagini panoramiche sferiche grazie al quale, attraverso l'individuazione di un piano dominante sulla scena, è possibile ottenere le ortofotografie di qualsiasi piano visibile sulla foto panoramica (spazio misurabile).

In questo paragrafo verrà mostrata l'intera procedura, sviluppata passo dopo passo, attraverso degli *screenshot* delle fasi di settaggio e di elaborazione compiute dal *software*.

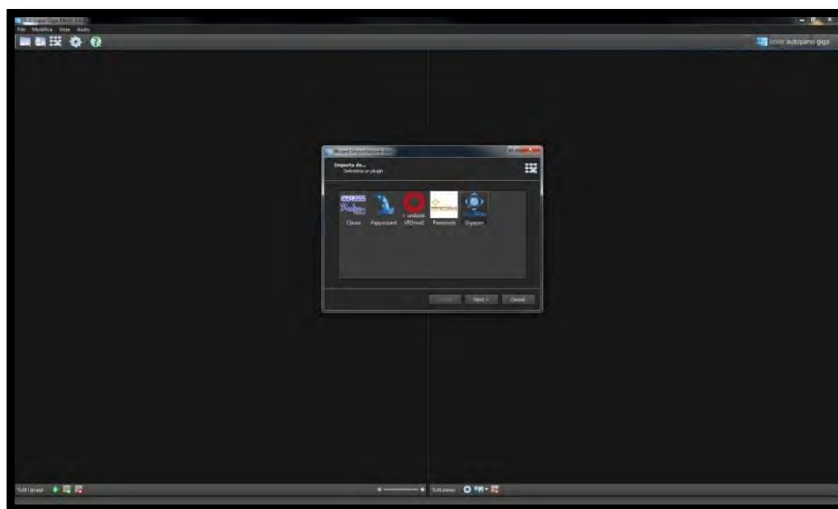


Fig. 8.5. **FASE 1:** scelta del plug-in associato al tipo di testa sferica utilizzata al fine di far riconoscere al software la corretta sequenza di fotografie che compongono la ripresa panoramica.

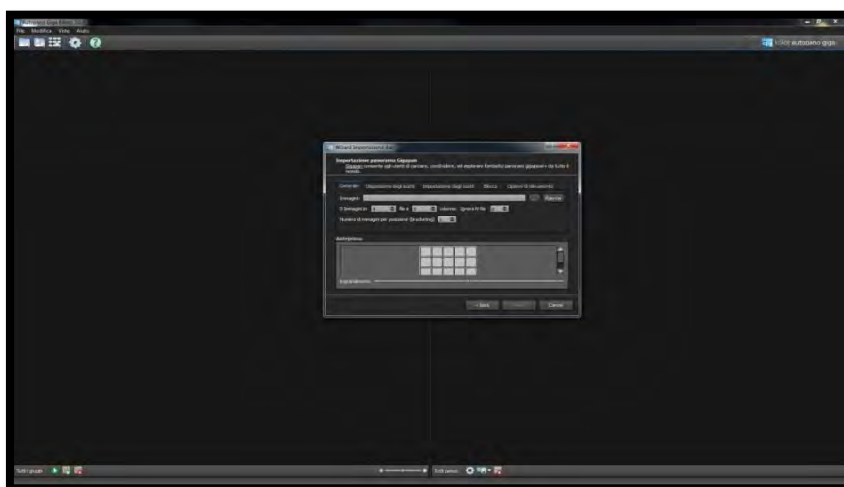


Fig. 8.6. **FASE 2:** settaggio dei parametri per l'acquisizione, l'impostazione e la disposizione degli scatti.

⁷⁰ PAPARELLA, R., VERGINE, F., *Il sistema edilizio*, ARACNEeditori, Padova 2007, p.43.

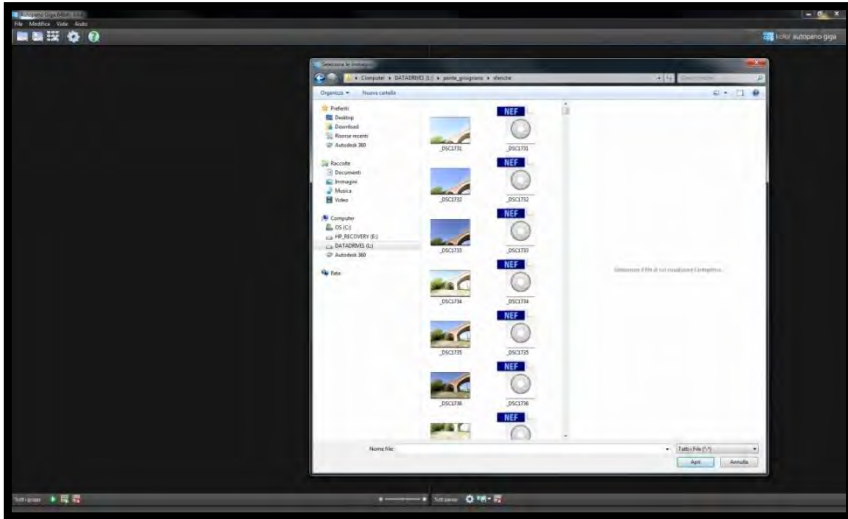


Fig. 8.7. **FASE 3:** selezione delle immagini che compongono la scena. Il processo di individuazione dell'immagine con esposizione migliore (su 3 immagini HDR) è automatico.

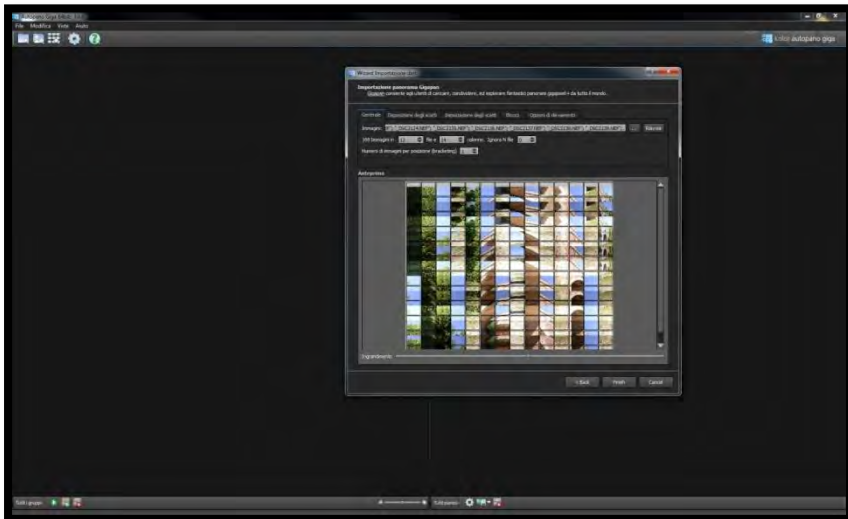


Fig. 8.8. **FASE 4:** Il software decodifica le immagini grazie al plug-in e le ordina in una matrice righe per colonne che rappresenta il mosaico che verrà composto.

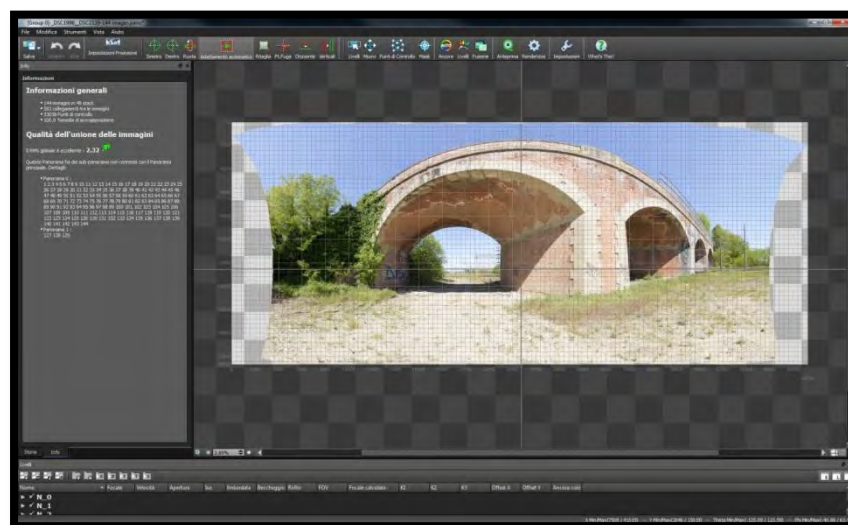


Fig. 8.9. **FASE 5:** Il software attraverso la ricerca dei punti omologhi degli scatti elabora l'immagine panoramica, aprendo un nuovo spazio di lavoro su cui sono disponibili parecchie operazioni. Si ha la possibilità di navigare in orbita 3D, di cercare allineamenti per sviluppare le ortofotografie, di modificare i parametri dei colori e di trasformare l'immagine panoramica.

Terminata la fase di preparazione l'immagine panoramica sferica è stata utilizzata per l'estrazione delle ortofotografie tramite i comandi *allineamento orizzontale* e *allineamento verticale*, suddivisi nelle seguenti fasi:

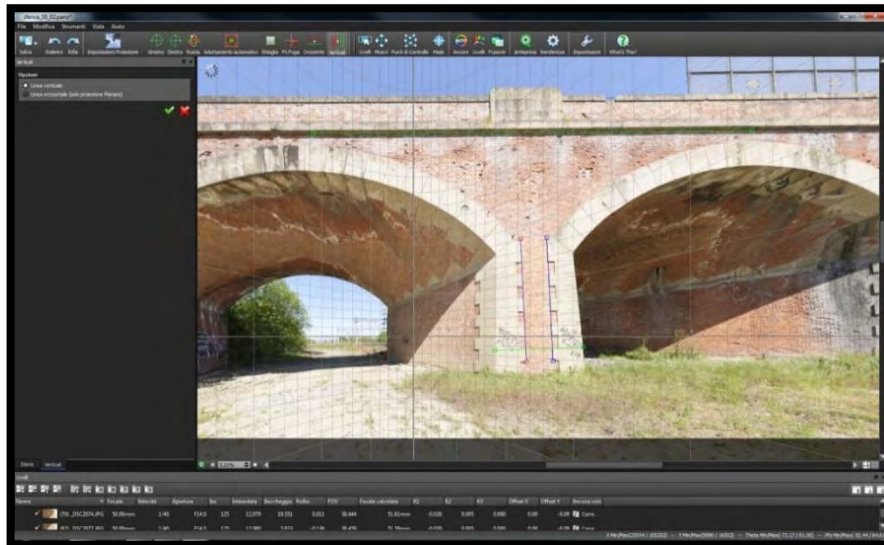


Fig. 8.10. **FASE 6:** i comandi di allineamento permettono di individuare un pseudo-piano sulla scena attraverso la traccia di due coppie di rette parallele, una orizzontale e una verticale, su riferimenti lineari che appartengono tutti allo stesso piano.

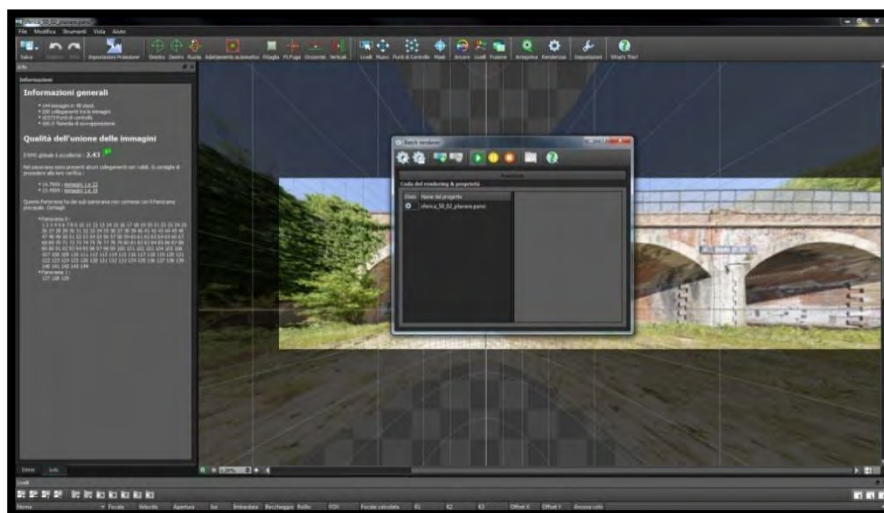


Fig. 8.11. **FASE 7:** Il software riconosce il piano individuato dalle rette e sviluppa l'ortofotografia effettuando un raddrizzamento fotografico.



Fig. 8.12. **FASE 8:** L'ultimo passo consiste nell'impostare il file di output attraverso il settaggio dei parametri per il rendering (dimensione formato, miscelazioni dei colori e destinazione).

Una volta ottenuta l'ortofotografia basta scalare l'immagine con riferimento ad una misura nota, rilevata *in situ*, per ottenere tutte le misure reali del piano che si è scelto per il raddrizzamento.



Fig. 8.13. Ortofotografia del prospetto ovest.

Guardando l'ortofotografia appare evidente che le parti dell'oggetto che non appartengono al piano raddrizzato risultano essere fortemente deformate e quindi prive di ogni riferimento utile ai fini della misurazione.

8.4. La restituzione del Modello tridimensionale

La restituzione tridimensionale ha riguardato solo una campata del ponte, sfruttando per i nostri fini la modularità delle arcate, verificata anche tramite le ortofotografie. Come ampiamente illustrato nel capitolo precedente, il modello 3D viene ricavato dall'elaborazione delle immagini catturate con la tecnica di ripresa ad assi convergenti tramite un particolare *software* di *image-modeling* (*Agisoft Photoscan Professional*) che, avvalendosi della strategia "Structure From Motion" (SFM)⁷¹, consente di orientare automaticamente un set, anche molto grande, di immagini e di generare una densa nuvola di punti corredata da *mesh* e *texture* per la resa visiva. Anche in questo caso la procedura viene mostrata nelle sue fasi di settaggio e di elaborazione, per mezzo di *screenshot*.

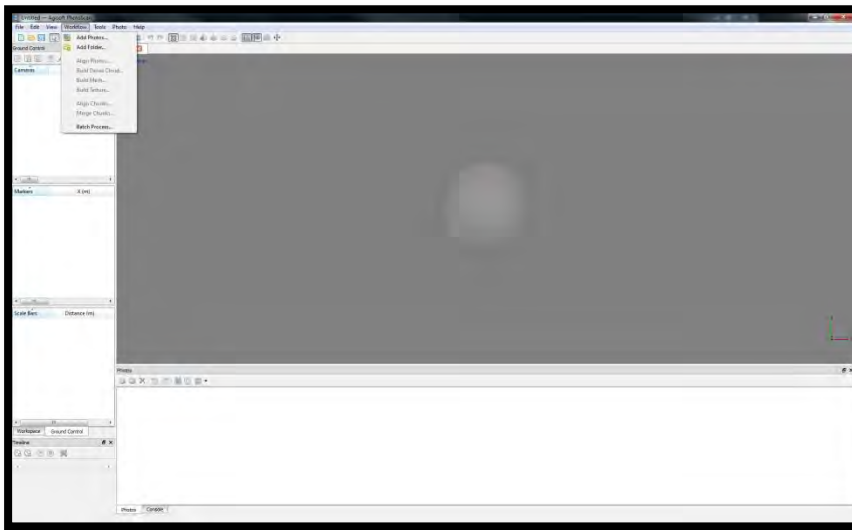


Fig. 8.13. FASE 1: Il primo passo consiste nella selezione delle immagini tramite il comando "add Photos" del menù "workflow".

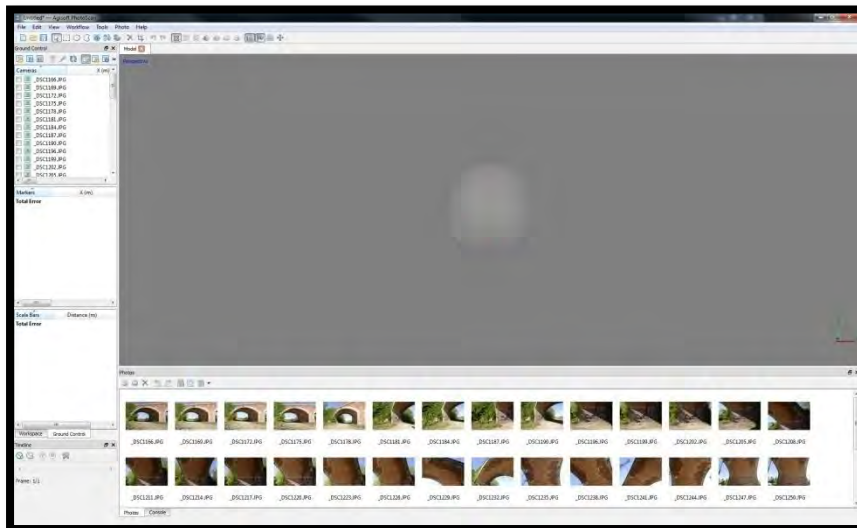


Fig. 8.14. FASE 2: Il software riconosce le immagini e le "accoppia" per l'individuazione dei punti omologhi. Nel nostro caso si sono utilizzati 4 scatti ad assi convergenti per avere più precisione. Il processo di individuazione dell'immagine con esposizione migliore (su 3 immagini HDR) è automatico.

⁷¹ Strumento che nasce dalla convergenza di due discipline, da una parte la Computer Vision che ha come fine l'automatismo nella generazione di modelli 3D, dall'altra la fotogrammetria che si pone l'obiettivo la documentazione misurabile dell'oggetto a partire dalle fotografie.

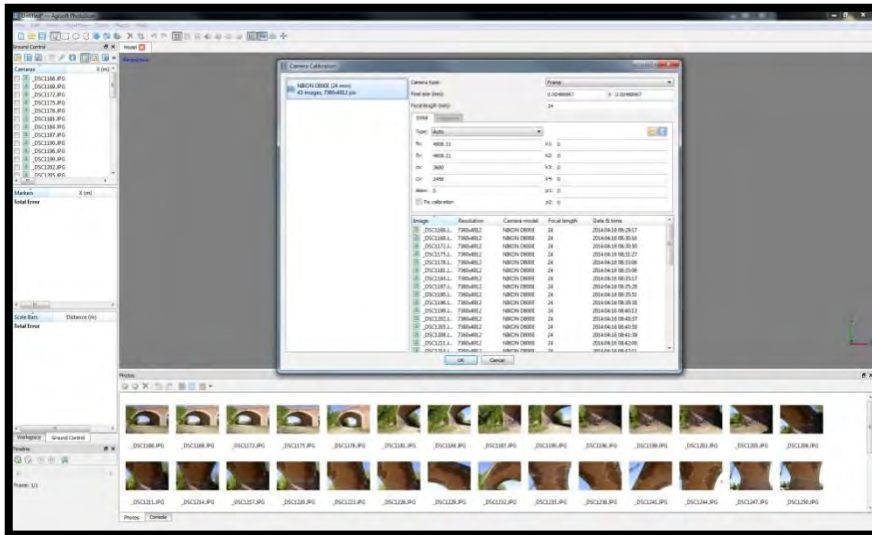


Fig. 8.15. **FASE 3:** tramite il comando "calibrate" del menù "workflow" si ha accesso alla fase di calibrazione e orientamento delle camere, il software riconosce la geometria della camera per poi restituire lo spazio reale. In questo caso si è scelto di procedere in modo automatico.

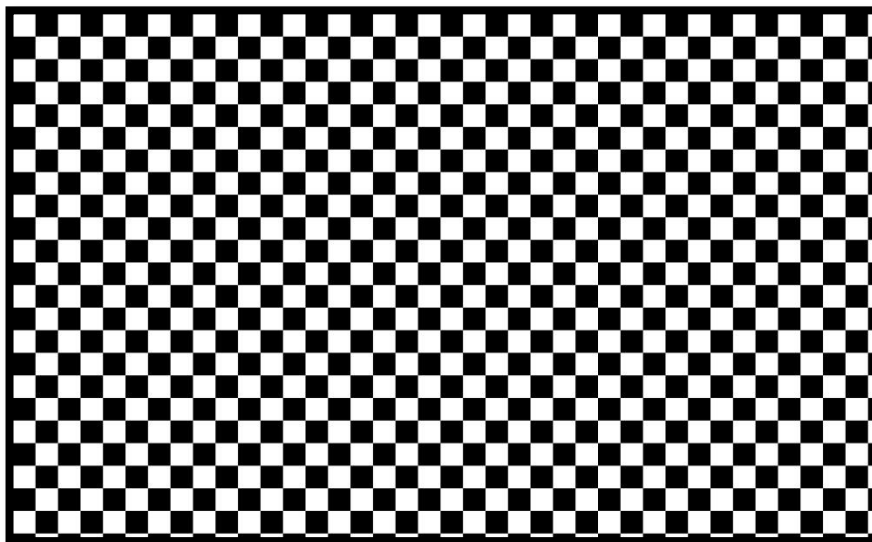


Fig. 8.16. **FASE 4:** La procedura automatica per la calibrazione e l'orientamento della camera consiste sostanzialmente nel far elaborare al software un'immagine a scacchiera scattata con la stessa camera e lo stesso obiettivo con cui è stato effettuato il rilievo.

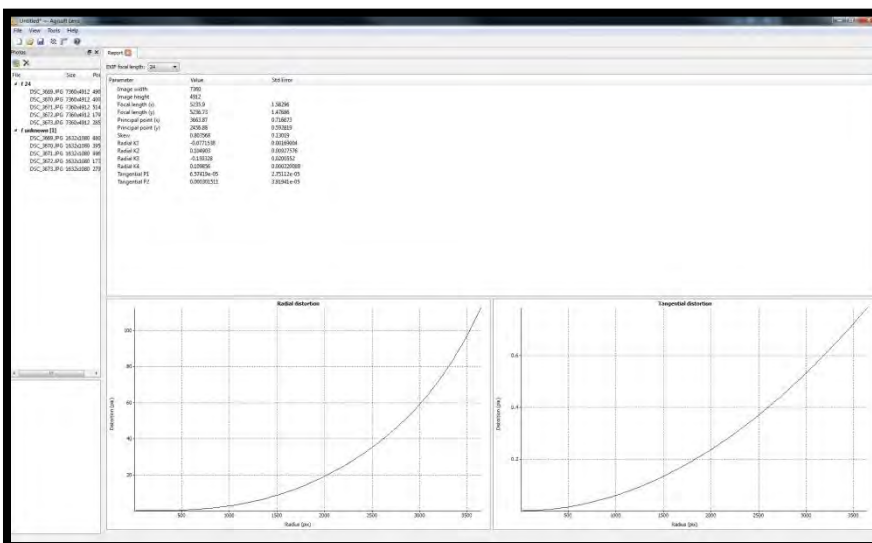


Fig. 8.17. **FASE 5:** Una volta riconosciuta la camera e la sua geometria il software mostra un report con i grafici dei parametri modificati per l'eliminazione delle distorsioni e delle aberrazioni ai fini del raddrizzamento.

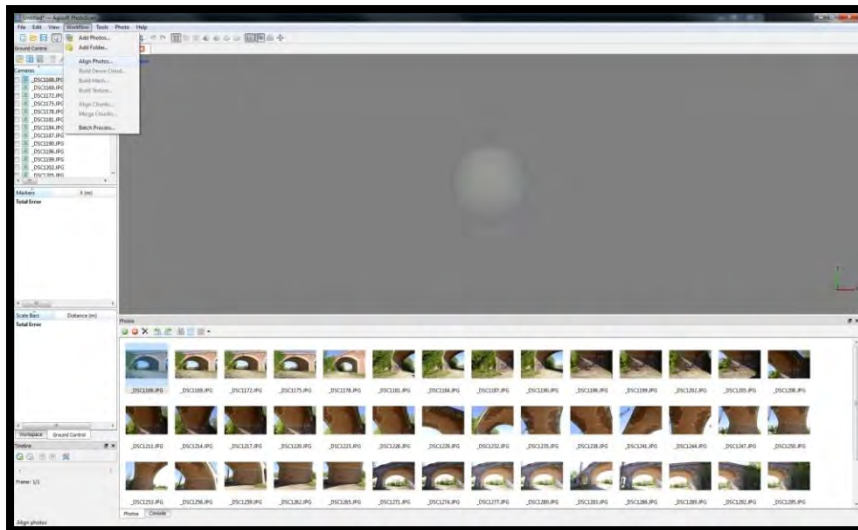


Fig. 8.18. **FASE 6:** Tramite il comando “Align Photos” si da inizio alla fase di acquisizione delle coordinate. Il software allinea le immagini per la ricerca delle coppie di punti omologhi, dopo di che ridistribuisce nello spazio i centri di presa. Una cosa importante di cui tener conto in questa fase sono i tempi che potrebbero risultare abbastanza lunghi.

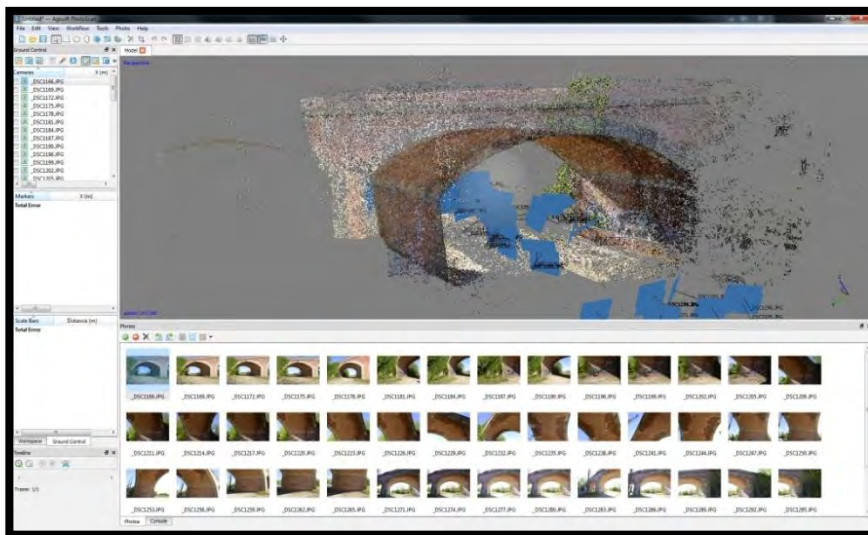


Fig. 8.19. **FASE 7:** Alla fine del processo, si ottiene la nuvola di punti che per la sua densità mostra già su schermo un’anteprima del modello utile per il controllo della avvenuta buona riuscita dell’operazione di allineamento. Inoltre il software riconosce e individua la distribuzione dei centri di presa usati in fase di rilievo.

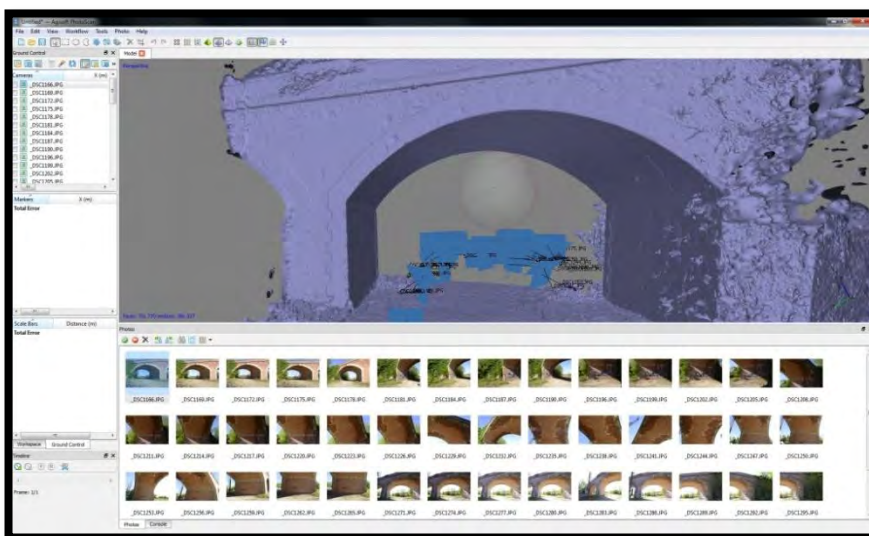


Fig. 8.20. **FASE 8:** Tramite il comando “Build Mesh” si da inizio alla fase di ricostruzione tridimensionale. Il software ricostruisce le mesh più o meno dense (in base ai settaggi di base) a partire dai punti omologhi individuati in fase di allineamento.

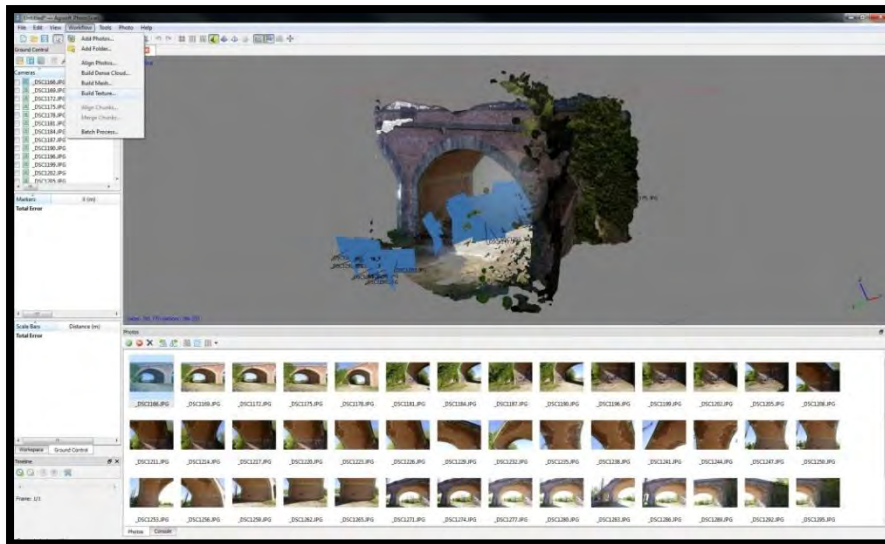


Fig. 8.21. **FASE 9:** Tramite il comando “Build Texture” si dà inizio alla fase di restituzione dell’apparenza visiva. Il software parametrizza le texture alle mesh e calcola la correzione del colore.

A questo punto non resta che esportare il modello in un formato compatibile⁷² con i software di modellazione tridimensionale di tipo parametrico/variazionale⁷³ che ne consentono la gestione, la pulitura delle mesh e il renderig.



Fig. 8.22. Vista in pianta del modello 3D.

⁷² I file utilizzati solitamente per l’esportazione dei modelli 3D sono di tipo (.obj) o (.txt), formati che permettono di definire la geometria a altre proprietà di oggetti grafici. Tramite questi formati possono essere elencate tutte le informazioni per la definizione di linee, poligoni, curve e superfici.

⁷³ Vedi Cap.2, par. 2.5.



Fig. 8.23. Vista in prospettiva del modello 3D.

8.5. La misurazione del modello e il calco degli elementi

Una volta conclusa la fase di restituzione del modello bi-tridimensionale del ponte si è passati alla fase di misurazione e calco dei singoli elementi, con il fine di verificare se il sistema costruttivo con il rispetto è a “*regola dell’arte*”, forti delle nozioni stereotomiche acquisite in precedenza; passando poi alle verifiche simiche con riferimento alla normativa italiana vigente.

Come prima cosa è stata fatta una verifica sull’arco, consapevoli del fatto che la sezione con un piano obliquo di un cilindro circolare retto deve essere necessariamente un’ellisse. Per far ciò si è usato il *Teorema di Pascal*⁷⁴ secondo cui considerati sei punti qualsiasi su una conica, $(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6)$ a formare un esagono irregolare inscritto nell’ellisse, i punti di intersezione delle coppie di lati "opposti" (A_1, A_2) , (A_4, A_5) , (A_2, A_3) , (A_5, A_6) , (A_3, A_4) , (A_6, A_1) , sono allineati in una retta detta *retta di Pascal*.

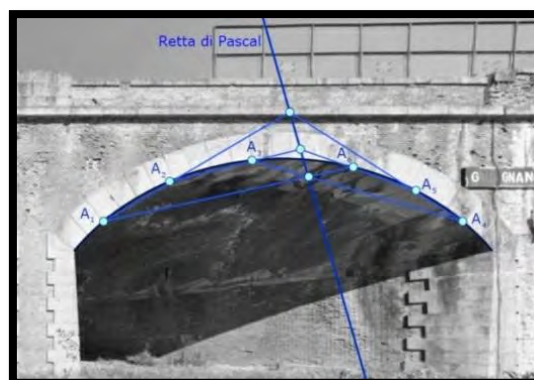


Fig. 8.24. Teorema di Pascal.

⁷⁴ Questo famoso teorema, noto come *Hexagrammum Mysticum*, fu scoperto da Blaise Pascal (1623-1662) all’età di 16 anni e pubblicato nell’opera *Essay pour le coniques*, a Parigi, nel 1640.

Accertato il fatto che la superficie di intradosso della volta è effettivamente una superficie cilindrica sono state costruite le proiezioni ortogonali della singola campata, pianta e prospetto, estratti dal modello 3D; da queste proiezioni si è potuto verificare anche la precisione della restituzione attraverso una comparazione tra le misure rilevate *in situ*. Il modello tridimensionale restituito con il metodo della fotomodellazione architettonica è effettivamente risultato molto preciso con un margine d'errore nell'ordine del millimetro.

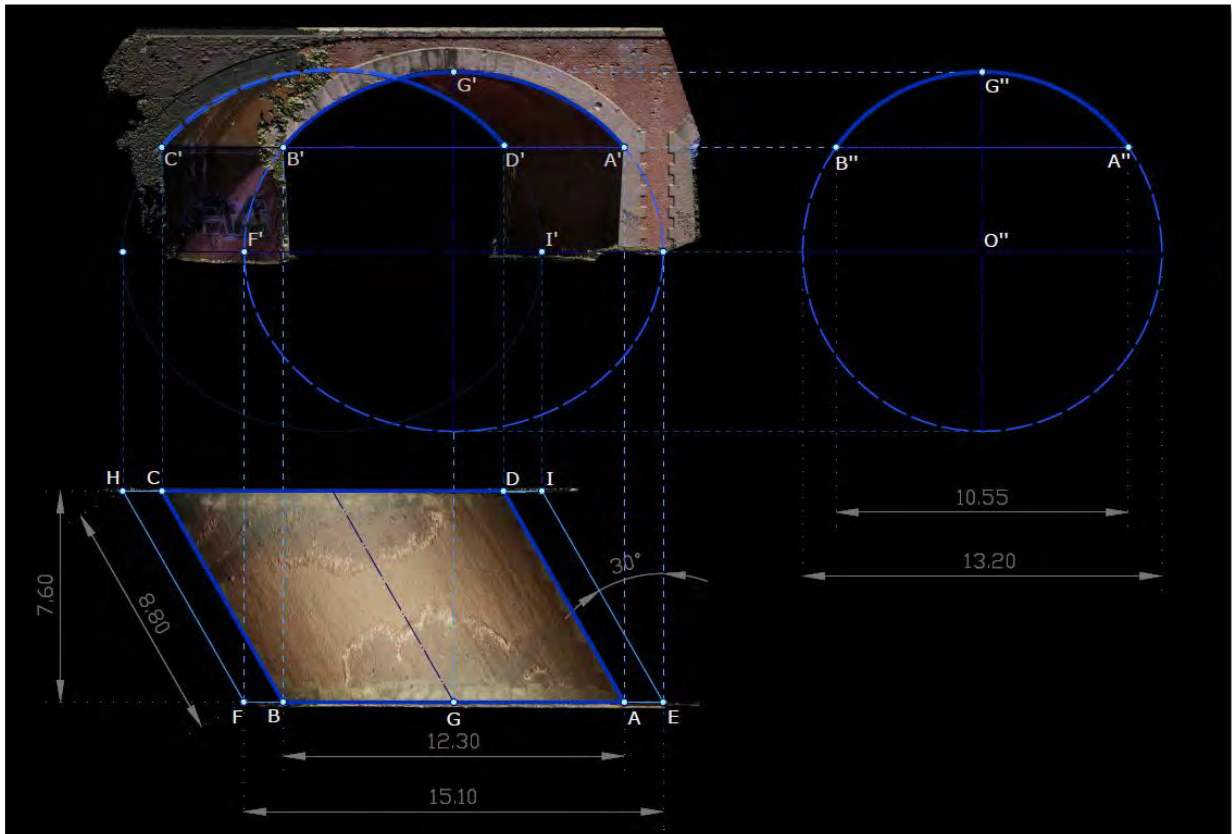


Fig. 8.25. Proiezioni ortogonali di una campata.

Il passo successivo ha riguardato il calco degli elementi che costituiscono la volta al fine di riuscire a svilupparli nel piano e nello spazio per il confronto con un ipotetica apparecchiatura elicoidale "ideale" costruita a *regola d'arte*. L'alta risoluzione della *texture* applicata al modello ha consentito di poter ricalcare con precisione tutti i conci di testa, mentre per i mattoni l'operazione di restituzione ha riguardato un solo filare.

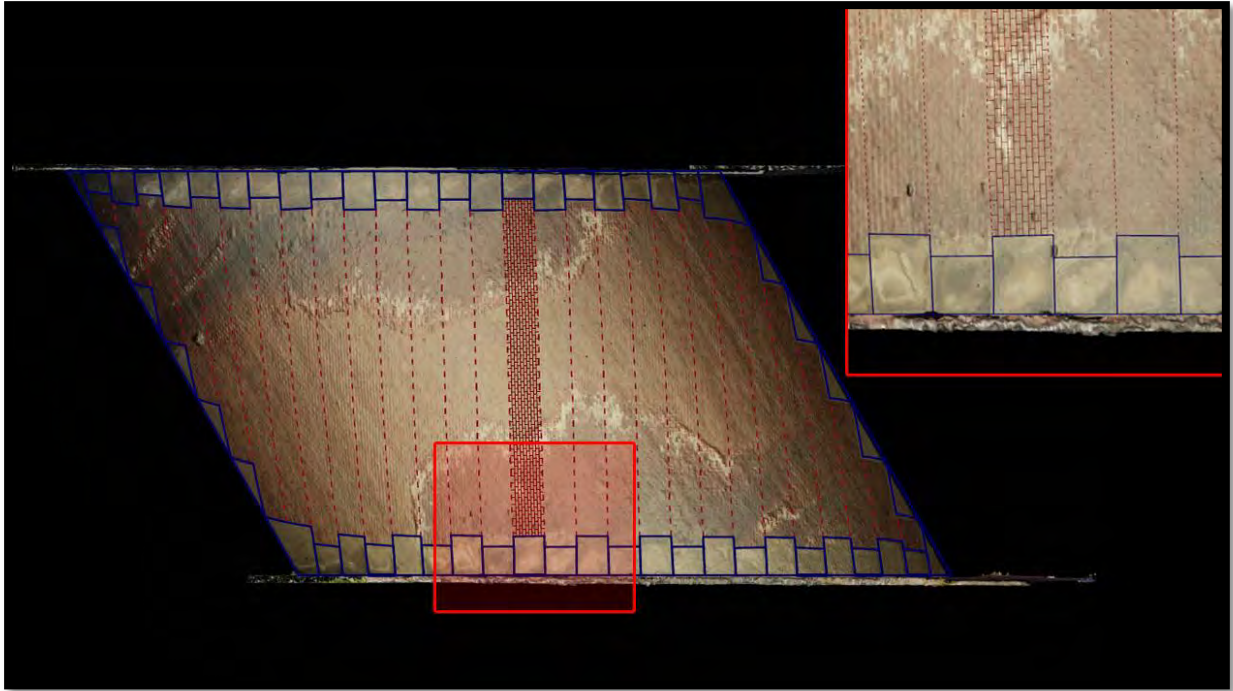


Fig. 8.26. Calco degli elementi in pianta.



Fig. 8.27. Calco degli elementi in prospettiva.

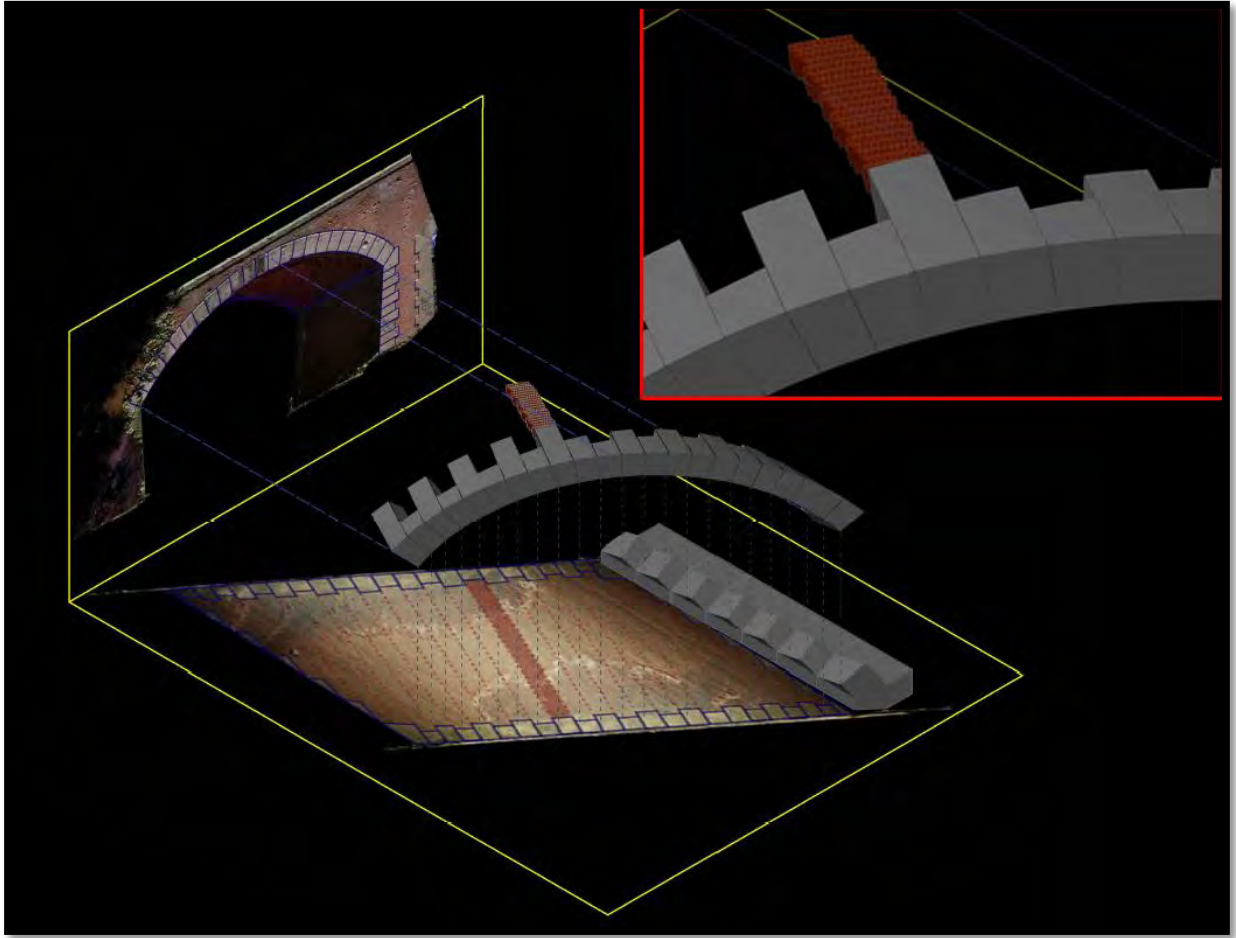


Fig. 8.28. *Calco 3D*.

8.6. Verifica dell'Apparecchiatura Elicoidale

Il rispetto dei requisiti geometrico-costruttivi, che seguono le regole stereotomiche delle apparecchiature elicoidali studiate nei capitoli precedenti, è stato verificato attraverso il confronto tra la disposizione degli elementi nel *modello reale*, ricalcati e modellati a partire dal modello tridimensionale restituito, e quella di un modello *ideale* costruito a *regola d'arte*. Il confronto tra i due modelli è stato effettuato sovrapponendo il loro sviluppo sul piano in modo da ottenere un confronto immediato tra le due apparecchiature, ideale ed effettiva.

8.6.1. Costruzione e sviluppo del modello reale

Come prima cosa è stata "aperta" sul piano la superficie cilindrica che rappresenta il paramento interno della volta e sono state individuate su di essa le rette generatrici necessarie per lo sviluppo delle eliche cilindriche che rappresentano le linee dei giunti dei conci (fig. 8.29).

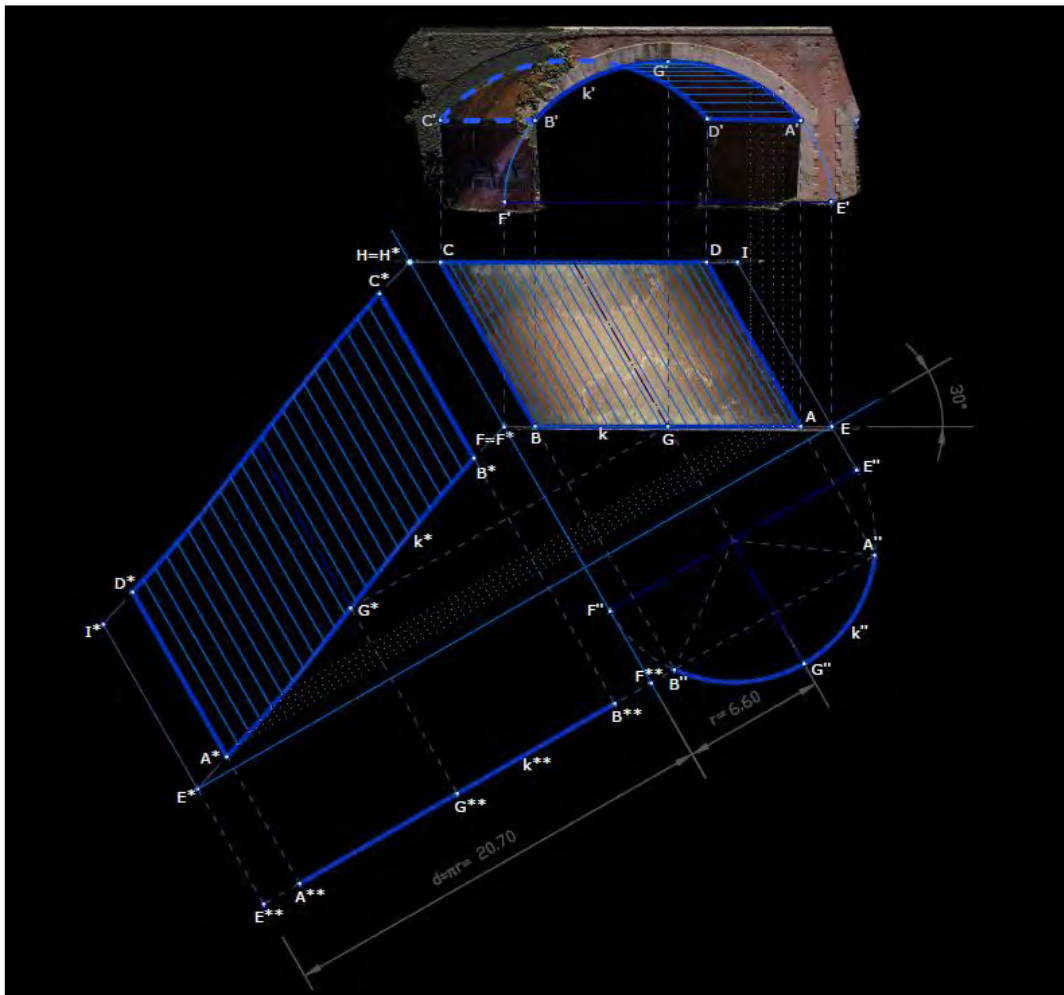


Fig. 8.29. Sviluppo della superficie cilindrica del paramento interno della volta.

Cioè sono state proiettate su tale sviluppo i due sistemi di eliche cilindriche, longitudinali e trasversali, ricalcate dal modello reale, in pianta e in prospettiva, mostrando il comportamento di una sola elica (*e, f*), prima, e la disposizione dell'intero sistema di eliche, poi.

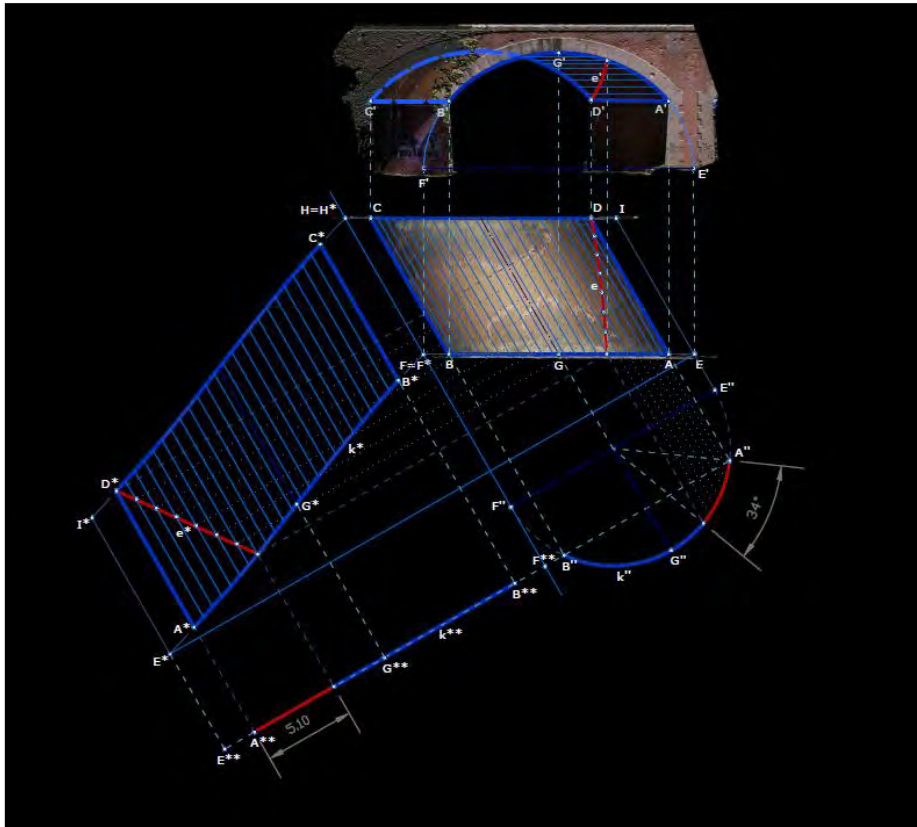


Fig. 8.30. Sviluppo sul piano di un elica longitudinale.

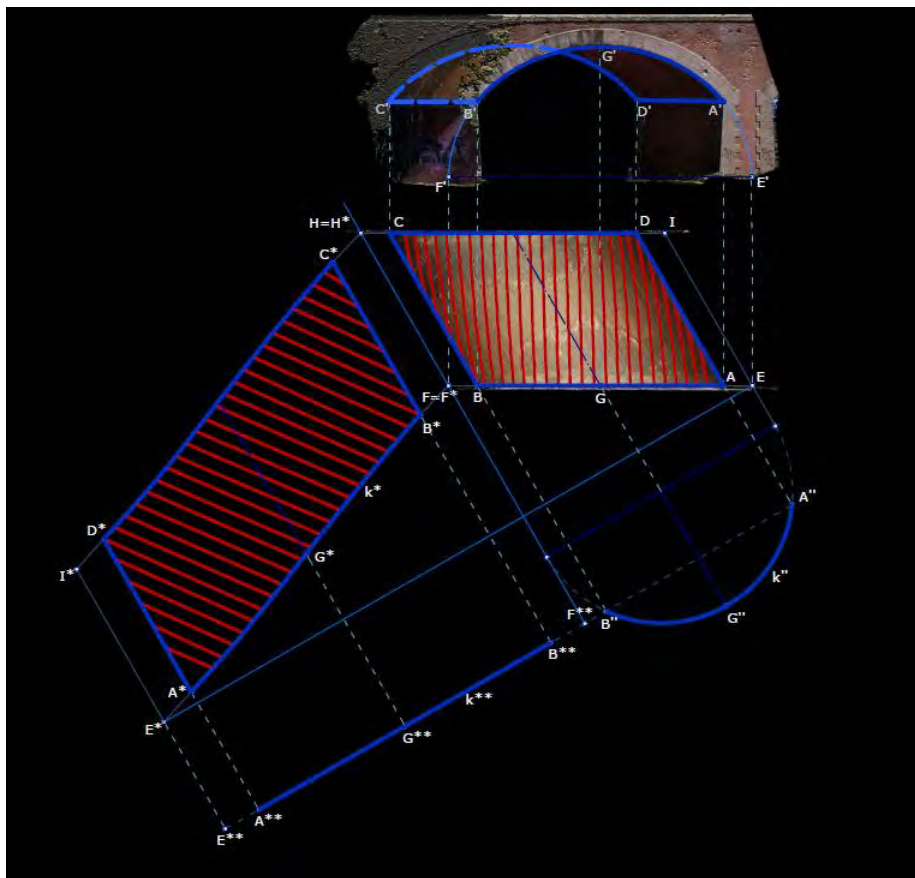


Fig. 8.31. Sviluppo sul piano del sistema di eliche longitudinali.

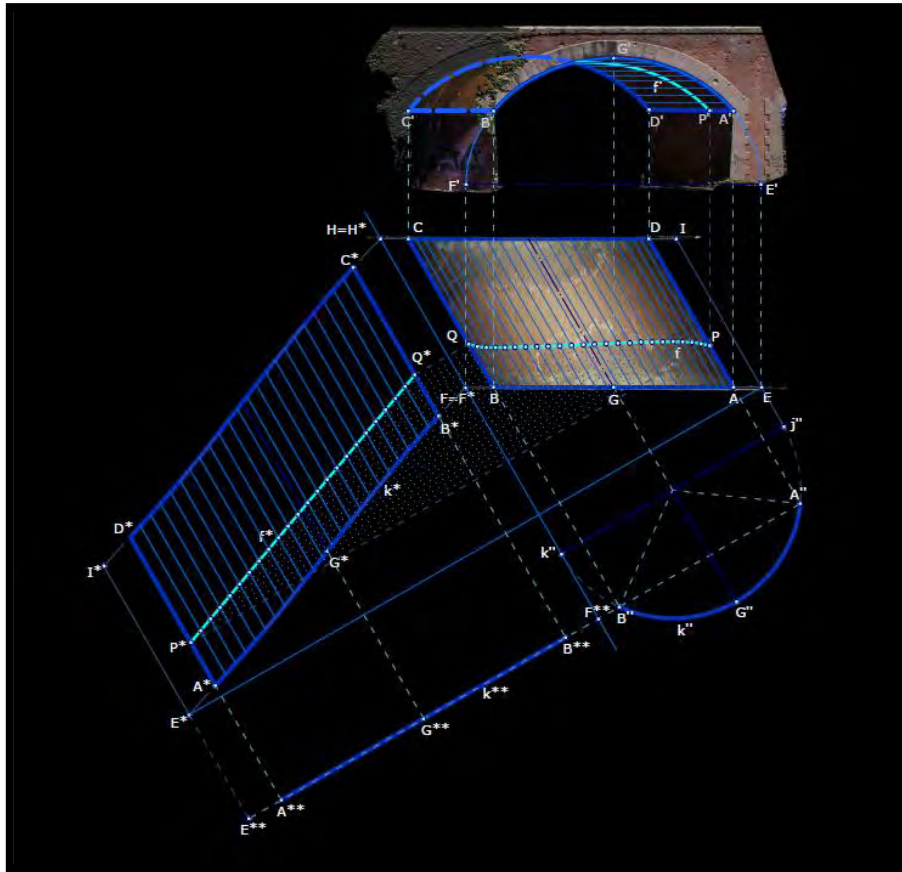


Fig. 8.32. Sviluppo sul piano di un elica trasversale.

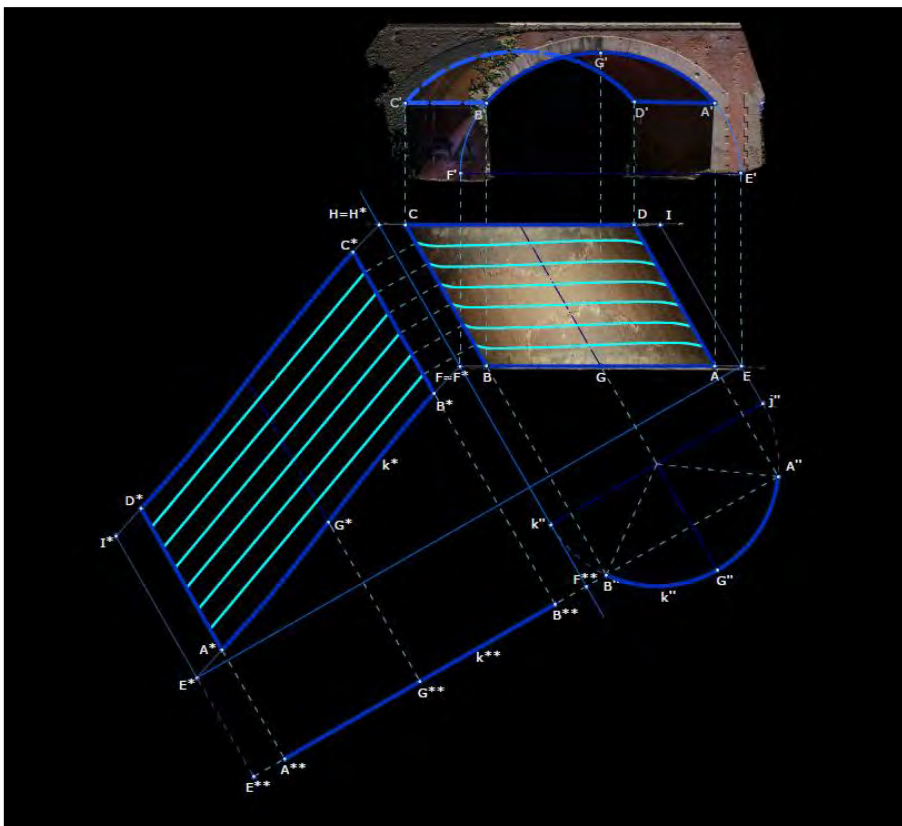


Fig. 8.33. Sviluppo sul piano del sistema di eliche trasversali.

Una volta sviluppati i due sistemi di eliche è stato possibile disegnare la sagoma dei conci d'imposta e dei conci di testa sullo sviluppo nel piano della superficie d'intradosso della volta.

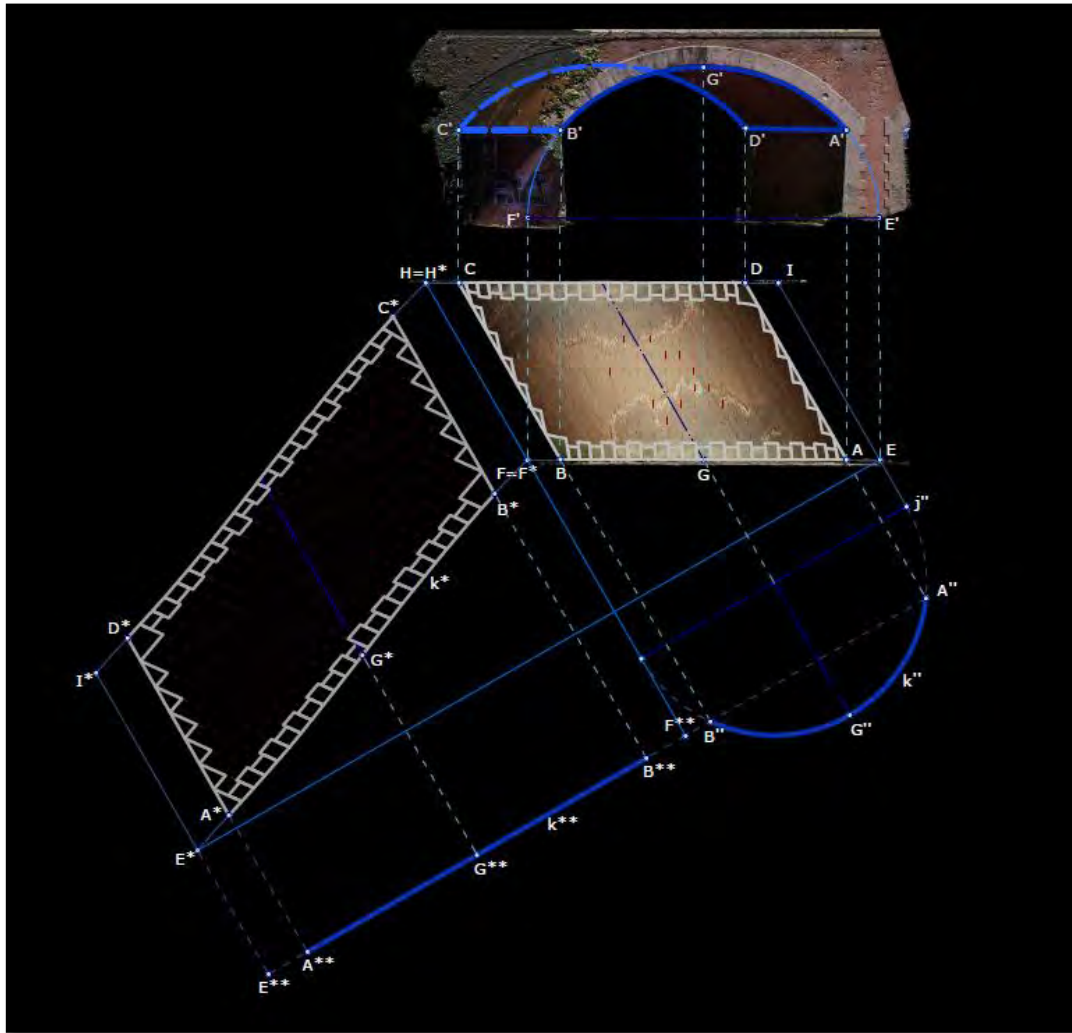


Fig. 8.33. Sviluppo sul piano dei conci.

8.6.2. Costruzione e sviluppo del modello ideale

Il modello ideale è stato realizzato sulla stessa geometria d'imposta del modello reale, quindi lo sviluppo della superficie d'intradosso è identico a quello del modello reale (fig. 8.29), inoltre è stato considerato lo stesso numero di conci sugli archi di testa (23), mentre la costruzione dei sistemi di eliche cilindriche ha visto il procedimento opposto rispetto a quanto fatto per il modello reale, e cioè disegnando sullo sviluppo prima per poi proiettare i risultati in pianta e prospetto.

A tal fine la corda (D^*C^*) è stata suddivisa in ventitre parti uguali e sono state tracciate, per ogni punto di suddivisione, le eliche longitudinali che dopo lo sviluppo coincidono con linee rette e ortogonali alla corda stessa. Le eliche trasversali invece sono state tracciate passando per i punti (M^*, N^*, Q^*), individuati dall'intersezione tra le eliche longitudinali e i lati d'imposta (A^*D^*, B^*C^*).

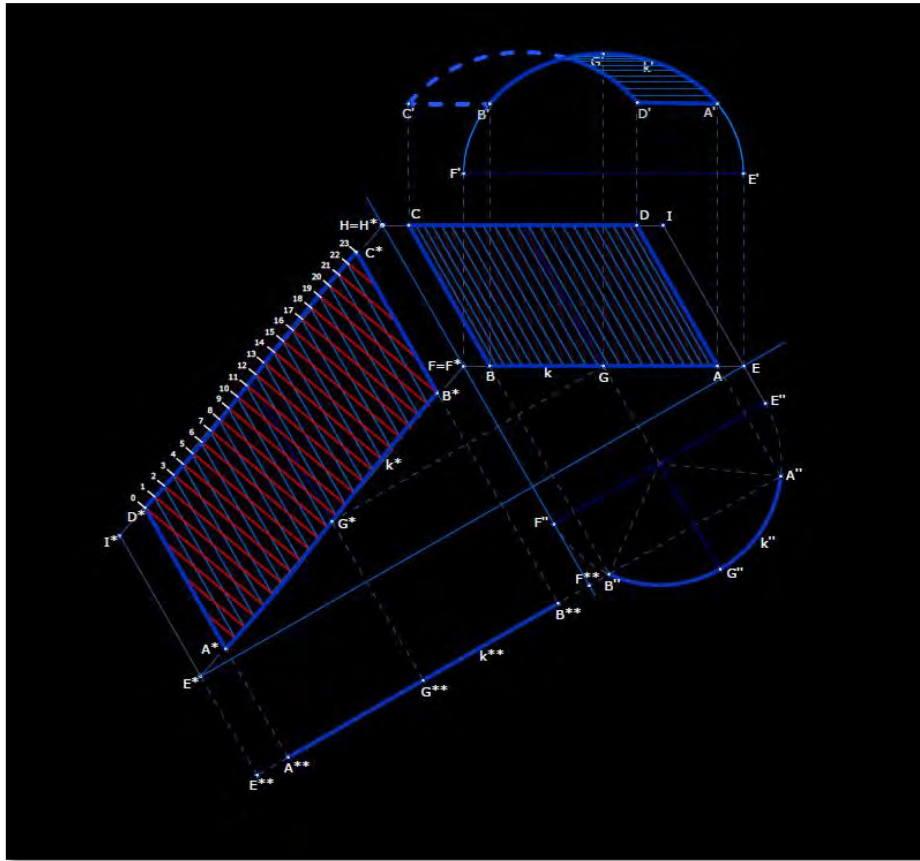


Fig. 8.34. Traccia sul piano del sistema di eliche longitudinali.

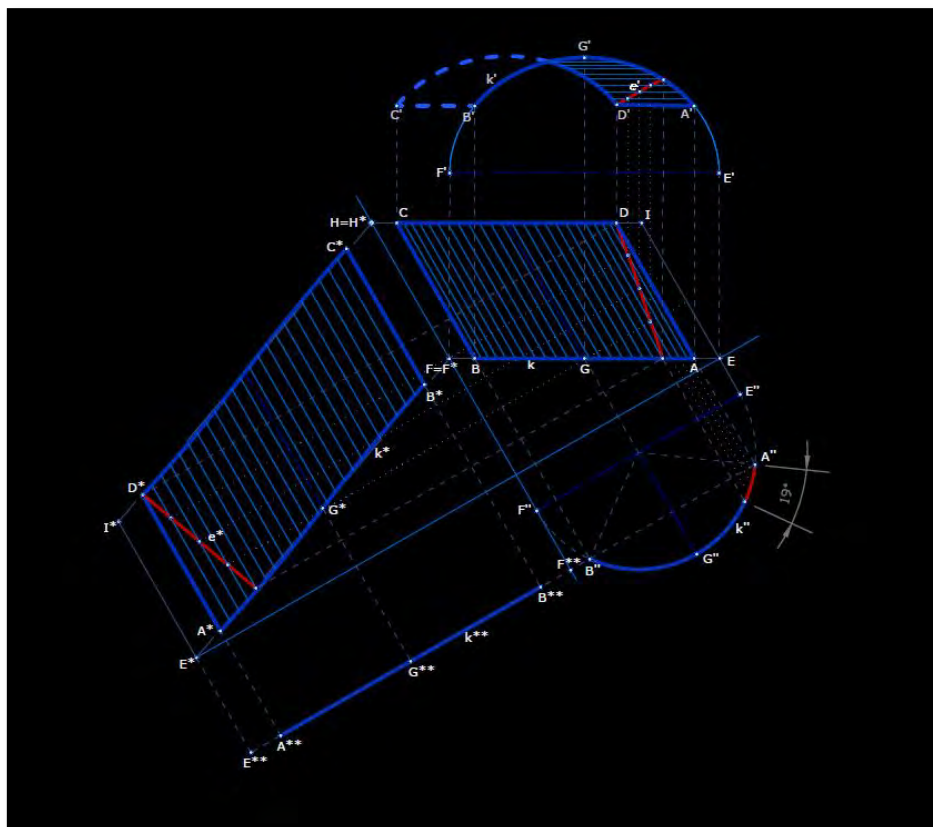


Fig. 8.35. Sviluppo in pianta e in prospetto di un elica longitudinale.

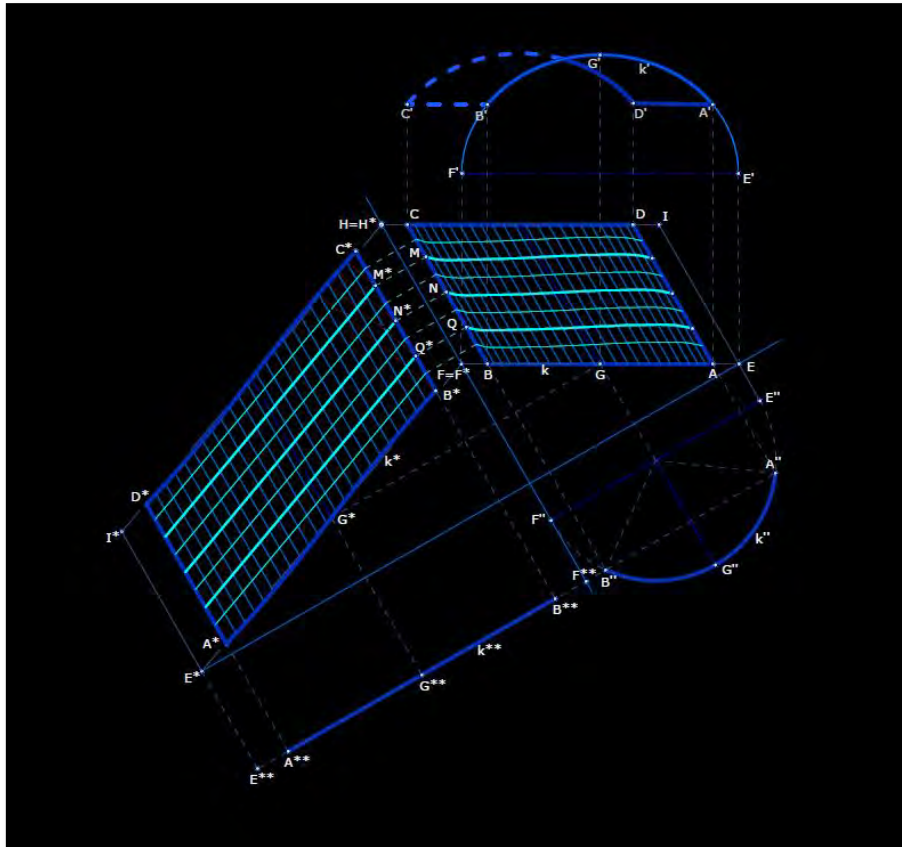


Fig. 8.36. Traccia sul piano del sistema di eliche trasversali.

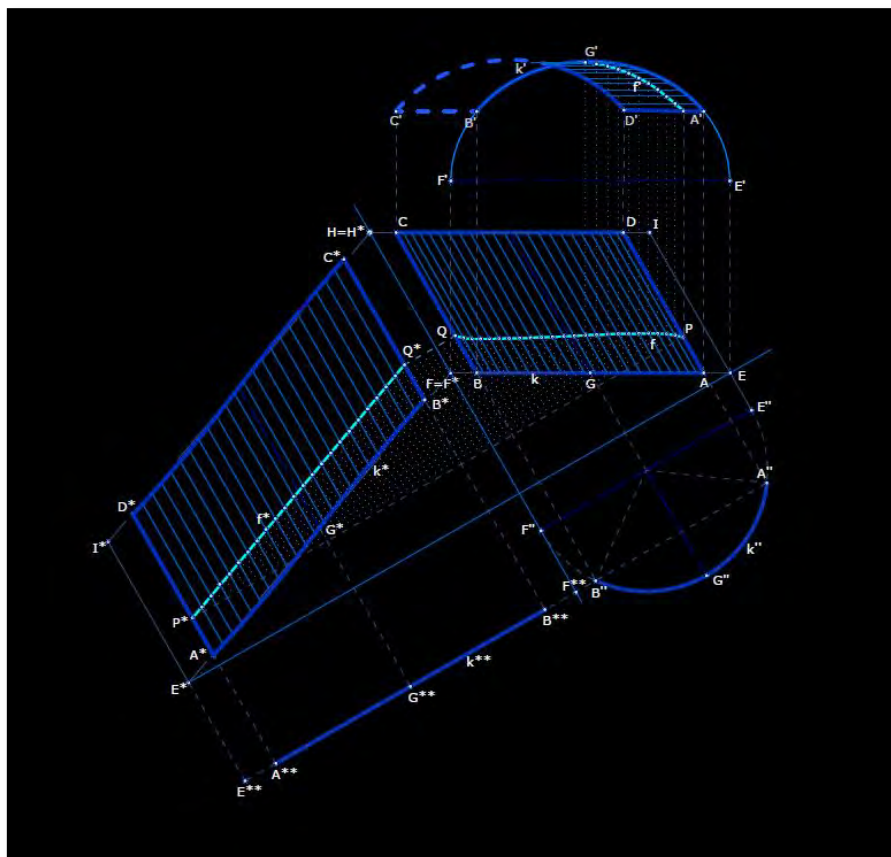


Fig. 8.37. Sviluppo in pianta e in prospettiva di un elica trasversale.

Esse sono rappresentate sul piano da rette parallele alle corde (D^*C^* , A^*B^*), e disposte in modo da avere l'alternanza tra i giunti discontinui.

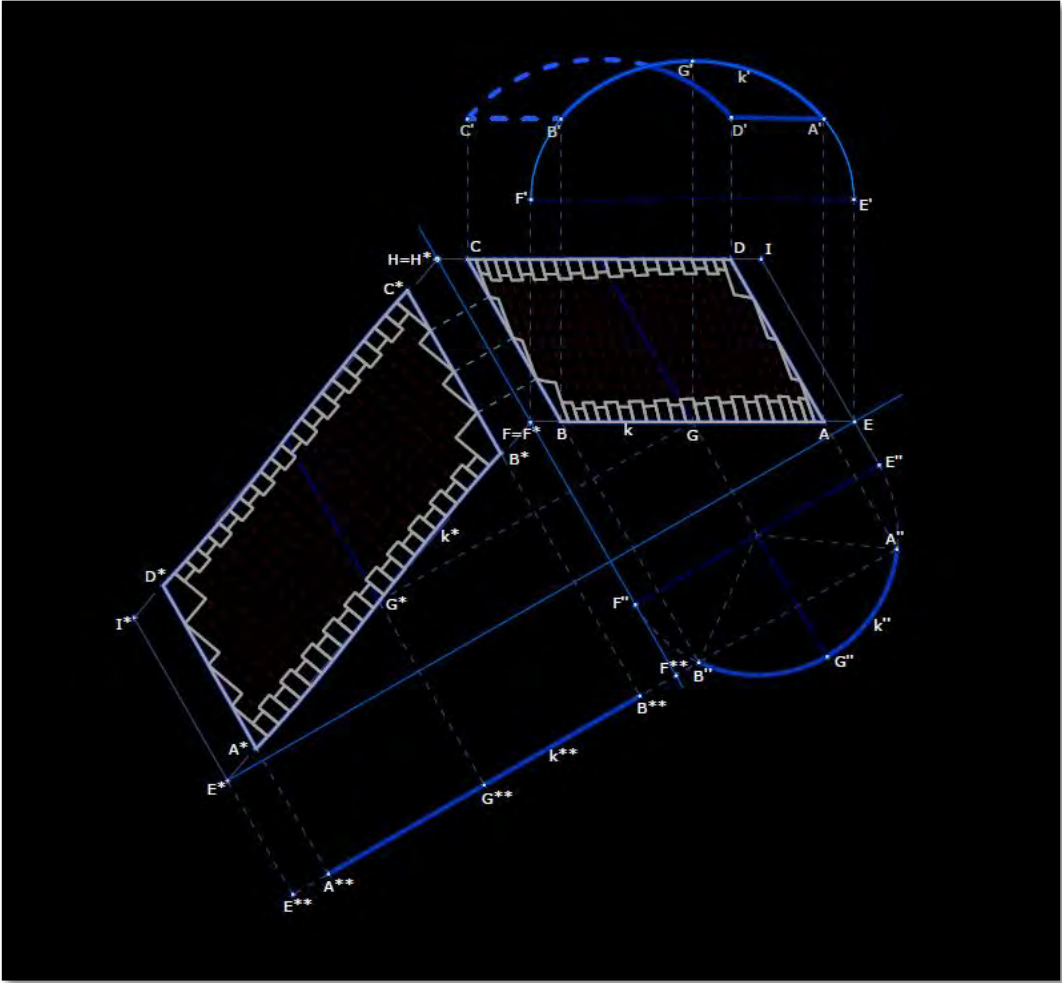


Fig. 8.38. Sviluppo dei conci.

8.6.3. Confronto fra i modelli

Come già anticipato il confronto fra i due modelli viene effettuato tramite sovrapposizione al fine di rendere più evidenti le differenze.

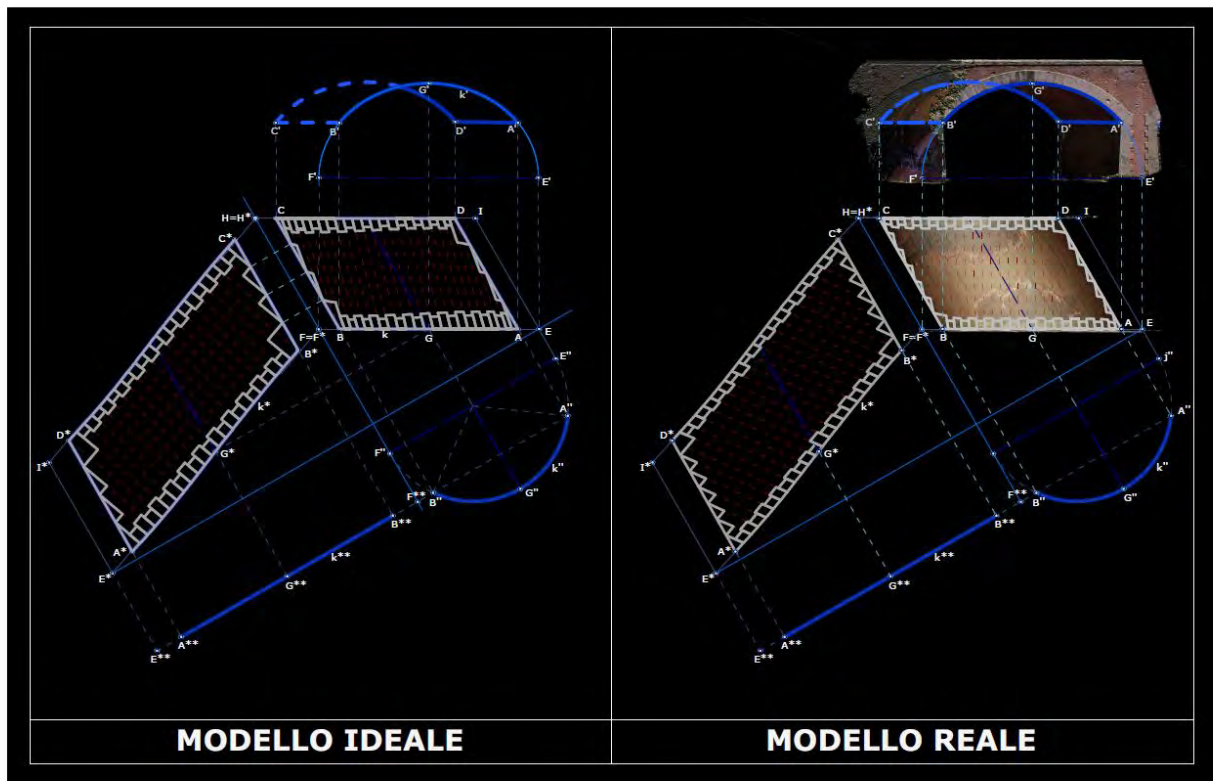


Fig. 8.39. Sviluppo dei conci dei modelli ideale e reale.

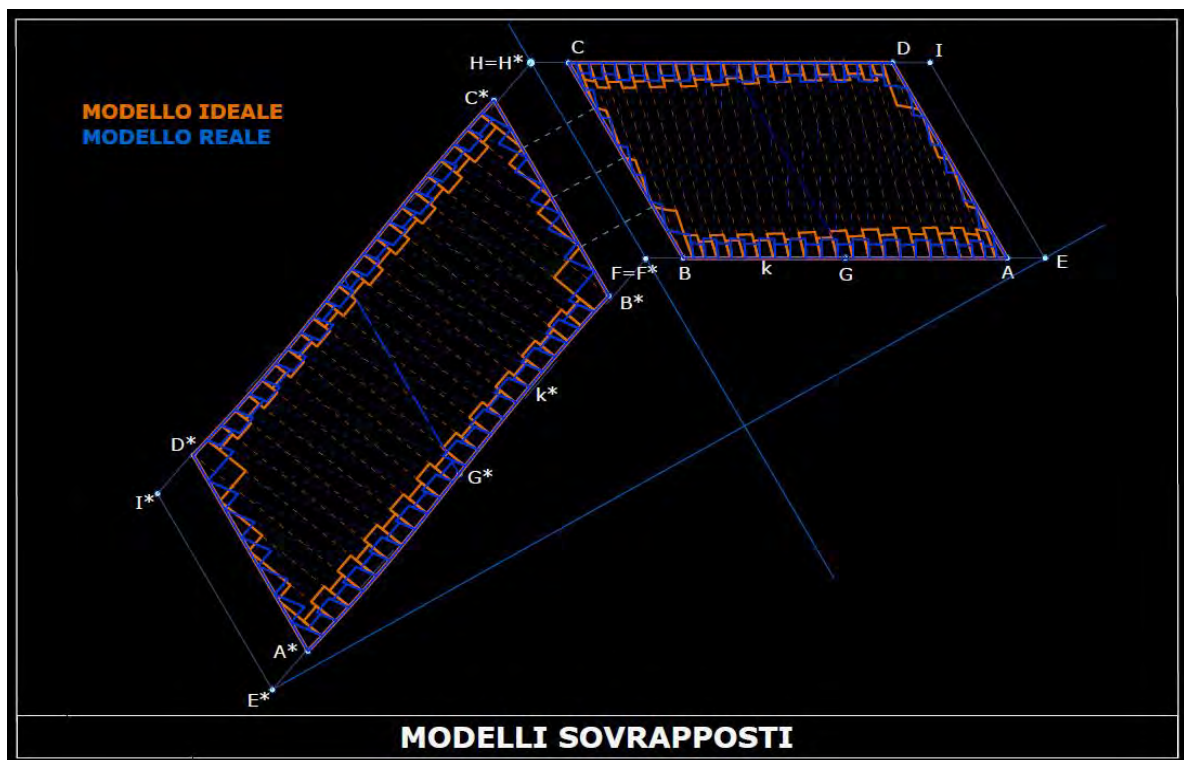


Fig. 8.40. Sovrapposizione tra sviluppi.

Dalla sovrapposizione tra l'apparecchiatura ideale e quella effettivamente realizzata emergono sostanziali differenze. La difformità più evidente riguarda la direzione del sistema di eliche longitudinali che nel modello reale non sono affatto ortogonali all'arco di testa, ma risultano leggermente inclinate, ne deduciamo che questa differenza sia dovuta principalmente al fatto che il costruttore sembra aver preferito mantenere le curvature delle eliche il più possibile perpendicolari agli archi di testa (approssimazione già evidenziata nel paragrafo 6.4.) in modo da avere conci di testa più simili tra di loro e linee dei giunti longitudinali più facilmente approssimabili con le faccette piane dei mattoni. Quest'approssimazione è anche la causa della seconda sostanziale differenza tra i due modelli: il numero dei conci d'imposta. Nell'apparecchiatura reale infatti l'inclinazione dell'intero sistema di eliche longitudinali fa in modo che si abbiano ben tre conci d'imposta in più, per lato, rispetto al modello ideale, il numero dei conci d'imposta dipende, infatti, dal sistema di eliche trasversali che passano per i punti d'intersezione tra le eliche longitudinali e i lati d'imposta della superficie cilindrica e, nel caso reale, queste eliche, essendo più inclinate, intersecano più volte il lato d'imposta. È importante notare che quest'approssimazione, effettuata sulle eliche longitudinali, è stata possibile solo grazie all'utilizzo dei mattoni: in una ipotetica apparecchiatura in conci di pietra avrebbe comportato la realizzazione di conci con angoli acuti, fortemente sconsigliati dalle regole stereotomiche.

8.7. Verifiche sismiche

8.7.1. Quadro normativo di riferimento

Di seguito l'elenco delle leggi e circolari di riferimento per l'analisi sismica dei ponti in muratura:

- Ordinanza n. 3274 della Presidenza Consiglio dei Ministri del 25 marzo 2003: *Normativa sismica ponti*;
- DM Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 14.01.2008: *"Norme tecniche per le costruzioni"*⁷⁵;
- Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti approvata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici *"Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni"*;
- DPC 21 ottobre 2003 Disposizioni attuative dell'art. 2, commi 2, 3 e 4, dell'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003. Nel quale sono previste le verifiche sismiche di livello 1 e 2 per opere ad alta priorità.

⁷⁵ Vedi Appendice 4.1

8.7.2. Approccio cinematico e Analisi plastica dell'arco in muratura

La verifica di un arco in muratura in condizioni di carico statico è stata ampiamente trattata in passato con metodi di calcolo manuali. Negli ultimi decenni ci si è trovati di fronte anche al problema della dinamica dell'arco, necessario per lo studio della risposta sismica di queste strutture, affrontato in modo ottimale grazie allo sviluppo di metodi di verifica agli elementi finiti. Questo nuovo metodo di verifica sembrerebbe la risposta a questi nuovi problemi di dinamica, grazie anche alla rapida evoluzione degli strumenti di calcolo, ma l'utilizzo del metodo agli elementi finiti va fatto con senso critico, soprattutto nel caso di strutture in muratura esistenti. La muratura, in modo specifico quella storica, è caratterizzata da una forte eterogeneità e da una limitata, se non nulla, resistenza a trazione, questo è il motivo per cui è necessario ricorrere a dei modelli fortemente non lineari per poter ottenere dei risultati realistici ed affidabili. Inoltre si ha la necessità di avere modelli di calcolo semplificati per avere sempre un confronto con i risultati informatici e sperimentali. Da studi fatti su esempi reali ed in laboratorio, è emerso che il livello tensionale negli archi in muratura è poco significativo per la verifica della sicurezza e l'entità delle deformazioni risulta essere poco interessante.

Il fattore condizionante è invece l'insorgere del *meccanismo di collasso*; il problema viene affrontato tramite l'analisi limite dell'equilibrio, secondo l'*approccio cinematico* che si basa sulla scelta dei cinematismi (meccanismi di collasso) e la valutazione dell'azione orizzontale che li innesca.

Il problema dell'equilibrio degli archi viene visto come un problema geometrico piuttosto che come un problema di resistenza dei materiali, lo schema strutturale isostatico dell'arco (3 cerniere) diventa labile e si trasforma in un cinematismo alla formazione della quarta cerniera, o della quinta in particolari condizioni di simmetria.

Definita la *curva delle pressioni* la linea la cui tangente in ciascun punto è coincidente con la retta d'azione della risultante di tutte le forze (comprese le reazioni vincolari), le cerniere hanno origine nei punti in cui la curva delle pressioni esce dallo spessore dell'arco intersecando le linee di intradosso o estradosso. L'elevato momento flettente che insorge induce, perciò, ad una forte parzializzazione della sezione. Se la curva delle pressioni giace all'interno del nocciolo centrale di inerzia, il momento flettente è di limitata entità e la sezione rimane interamente compressa. Naturalmente la scarsa resistenza a trazione della muratura, in caso di parzializzazione della sezione, porta la sezione stessa ad aprirsi (fessurazione) riducendo ad una limitata zona di contatto la trasmissione dello sforzo di compressione tra i due conci successivi.

È lecito pertanto fare le tre seguenti ipotesi (J. Heyman, 1982) nel metodo di verifica degli archi murari:

- infinita resistenza a compressione della muratura;

- resistenza a trazione nulla della muratura;
- assenza di scivolamento tra due conci successivi.

L'assenza di scivolamento è giustificata dal fatto che l'elevato sforzo di compressione comporta un elevato sforzo tangenziale tra due conci contigui.

La verifica di sicurezza viene condotta definendo intensità e posizione dei carichi che fanno uscire la curva delle pressioni dallo spessore dell'arco; analogamente si può dire che la verifica consiste nel ricercare lo spessore minimo per contenerla all'interno della sagoma dell'arco. Partendo dall'ipotesi che all'interno dello spessore di un arco si possono distinguere infinite linee di forza, se ne possono individuare due esterne che individuano il poligono funicolare dei carichi; riducendo via via lo spessore dell'arco, i due valori estremi tendono a coincidere e il poligono funicolare risulta essere unico, a questo punto si arriva al collasso dell'arco per formazione di un meccanismo di rottura. A dimostrazione di tale affermazione ci si può avvalere di due teoremi (Clemente, 1995): il *Teorema della plasticità* ed il *Teorema dell'unicità*.

Il teorema di plasticità (o della sicurezza) afferma che *“una struttura è sicura se può essere individuata un poligono funicolare in equilibrio con i carichi esterni, giacente tutta all'interno della sagoma dell'arco”*. La curva funicolare trovata non deve essere necessariamente quella effettiva, ma una qualsiasi curva funicolare che rispetti la condizione di equilibrio ed iscrizione nella sagoma dell'arco. Inoltre non interessa l'effettiva distribuzione delle tensioni all'interno della sezione e quindi non è necessario conoscere il legame costitutivo del materiale. E' il fatto che la curva funicolare è interna alla sagoma che assicura che tra una sezione e l'altra vengano trasmessi solo sforzi di compressione.

Il teorema dell'unicità afferma che *“data una struttura con carichi permanenti immutati e soggetta a carichi accidentali che variano dal loro valore di esercizio al valore di collasso, il valore del moltiplicatore dei carichi accidentali corrispondente alla rottura è unico”*.

8.7.3. L'automatizzazione della procedura

Per poter verificare la stabilità di un arco soggetto ad un evento sismico (azioni orizzontali), è stato utilizzato un *foglio di calcolo* in cui è possibile studiare il meccanismo di rottura di un ponte ad arco attraverso delle relazioni geometriche e le verifiche da Normativa⁷⁶, considerando partecipante al meccanismo solo l'arco, al variare dello spessore e della luce del manufatto.

L'impostazione iniziale dei fogli all'interno dei quali sono implementati i cinematismi che riguardano i ponti ad arco in muratura⁷⁷ prevede, innanzitutto, la creazione della geometria della struttura,

⁷⁶ VEDI Appendice 4.1

⁷⁷ VEDI Appendice 4.3

seguita dall'assegnazione di una rotazione virtuale e dal calcolo degli spostamenti del baricentro di ciascun concio; dal calcolo dei pesi propri dei conci e del riempimento soprastante l'arco con condizioni di carico per verifiche in presenza di carichi orizzontali e infine dall'applicazione del *principio dei lavori virtuali* e dallo svolgimento delle verifiche sismiche.

La geometria complessiva viene valutata attraverso una discretizzazione dell'arco in conci e si riferisce alla linea d'asse della struttura, mentre le cerniere sono collocate all'estradosso o all'intradosso dello spessore dell'arco, conformemente al meccanismo reale della struttura (fig. 8.41).

La rappresentazione dei singoli conci, da implementare nel foglio di calcolo, viene fatta con coordinate cartesiane e le posizioni dei baricentri sono calcolate con le seguenti formule:

$$X_{Gi} = \frac{L}{2} - \left[R_i * \sin \left(\frac{\beta}{2} - \Delta\beta * n^{\circ} \text{concio} + \frac{\Delta\beta}{2} \right) \right]$$

$$Y_{Gi} = R_i * \cos \left(\frac{\beta}{2} - \Delta\beta * n^{\circ} \text{concio} \right) - (R - f)$$

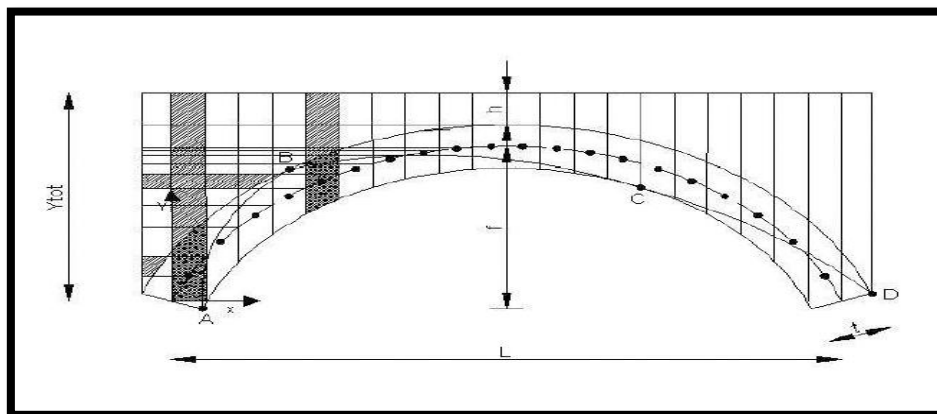


Fig. 8.41. Schema per la definizione della geometria. (Fonte:CLEMENTE, 1988).

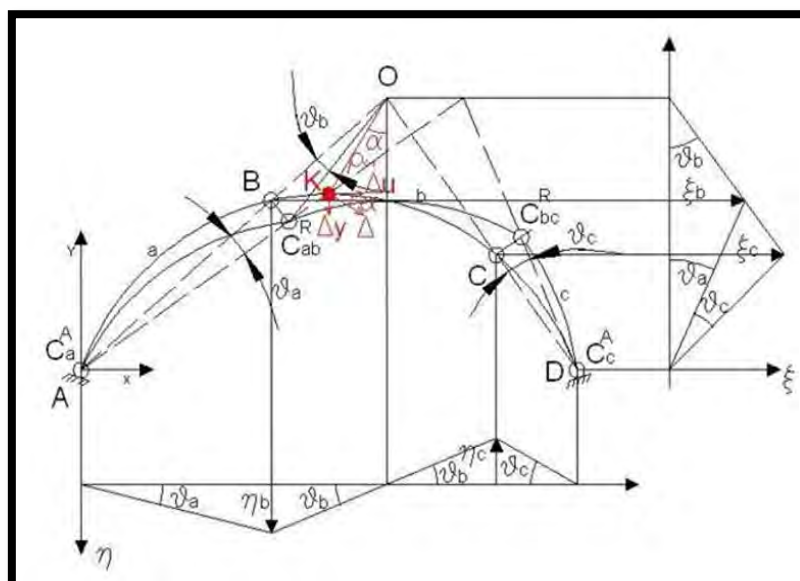


Fig. 8.42. Schemi per la definizione degli spostamenti. (Fonte:CLEMENTE, 1988).

Una volta definita la *geometria*, si procede con lo studio del *cinematismo* che si innesca per carichi orizzontali e si individuano, al collasso, le quattro cerniere plastiche A,B,C,D che suddividono l'arco in tre in tronchi (fig. 8.42).

E' opportuno ricordare che queste cerniere nella rappresentazione schematizzata si trovano sulla linea d'asse dello spessore dell'arco, mentre nella realtà si trovano all'estradosso o all'intradosso a seconda delle posizioni. È da considerare che è stata fatta anche un'altra semplificazione: le cerniere sono state considerate come ideali, ovvero perfettamente collocate sullo spigolo e senza attrito, anche se la realtà è differente, in quanto sussiste la possibilità di schiacciamento e di frantumazione del materiale lapideo sullo spigolo stesso. Fatto ciò viene assegnata al tronco *a* una rotazione iniziale θ_a e poi vengono calcolate le altre, in base a questa, attraverso le formule:

$$\theta_b = -\frac{X_B - X_A}{X_C - X_O} \theta_a$$

$$\theta_C = -\frac{X_C - X_O}{X_C - X_D} \theta_b$$

Le coordinate del centro istantaneo di rotazione *O* (fig. 8.43), calcolato per il tronco *b*, individuato dall'intersezione delle rette passanti rispettivamente per *A* e *B*, la prima, e per *C* e *D* la seconda, verranno calcolate con i metodi classici della geometria in cui sono note le equazioni delle rette base:

$$y(x) = m_a x + q_a \quad \text{per la retta } a$$

$$y(x) = m_b x + q_b \quad \text{per la retta } b$$

con
$$m_a = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}; \quad m_b = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C}$$

e con
$$q_a = y_A - m_a x_A; \quad q_b = y_C - m_b x_C$$

risulta:

$$y_o = \frac{q_a - q_b \frac{m_a}{m_b}}{1 - \frac{m_a}{m_b}}$$

$$x_o = \frac{y_o - q_b}{m_b}$$

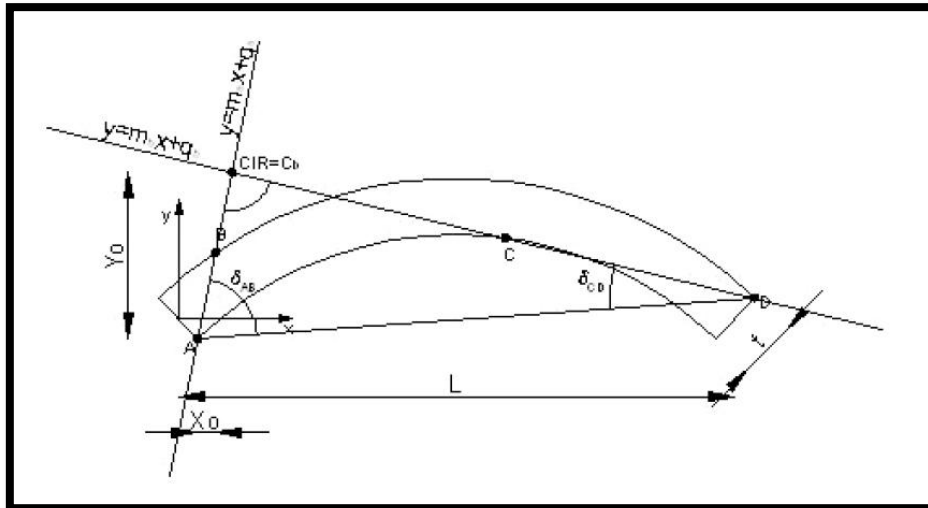


Fig. 8.43. Individuazione del centro di rotazione dell'arco. (Fonte: CLEMENTE, 1988).

Il foglio di calcolo così impostato è in grado di implementare in ogni istante la posizione del centro istantaneo di rotazione delle cerniere plastiche che si creano, basta assegnare una rotazione relativa al tronco α per poter calcolare gli spostamenti in qualsiasi punto dell'arco. Vengono successivamente calcolati gli spostamenti Δ del tronco α e il raggio congiungente ρ nelle componenti x e y , considerando come punto di riferimento la cerniera A e utilizzando le seguenti espressioni:

$$\rho_{Ai} = \sqrt{(X_A - X_i)^2 + (Y_A - Y_i)^2}$$

$$\Delta_i = \arctan\left(\frac{Y_i - Y_A}{X_i - X_A}\right)$$

Dalle quali si ricava:

$$\Delta_{x_i} = \Delta_i \sin \delta_i$$

$$\Delta_{y_i} = \Delta_i \cos \delta_i$$

È stato scelto come punto di controllo il punto di chiave dell'arco e come spostamento il suo spostamento orizzontale. Si riscontra subito che la cerniera B si sposta in basso e verso destra, mentre la cerniera C si sposta ancora verso destra e in l'alto.

Noti gli spostamenti è possibile calcolare i lavori delle forze peso dei conci in cui è stata suddivisa la struttura ad arco, della forza peso dei "conci" di terreno che sovrastano l'arco e delle eventuali forze laterali che spingono nel caso in cui sia presente il riempimento laterale. I pesi dei conci dell'arco sono stati calcolati con semplici considerazioni geometriche e lo stesso è stato fatto per i "conci" di terreno di riempimento adottando una condizione di carico $M3^{78}$.

⁷⁸ VEDI Appendice 4.2.

Fatto questo si eseguono le *verifiche di sicurezza* calcolando il moltiplicatore dei carichi α_0 , l'accelerazione spettrale a_0^* e lo spostamento spettrale d_0^* che portano l'arco al collasso.

Va ricordato che, come prima cosa, quando si inizia ad utilizzare il foglio di calcolo sopra descritto, bisogna individuare la posizione delle cerniere fra tutte le combinazioni di posizioni possibili, in particolare si procede scegliendo la più probabile, ovvero quella che fornisce il minimo valore del moltiplicatore dei carichi.

8.7.4. Descrizione della geometria strutturale

L'opera è un ponte ad arco in muratura obliquo, *multicampata a pile tozze*; presenta quattro campate con arcate di forma ellittica di luce pari a $12,30\text{ m}$. La quota stradale è raggiunta con materiale di riempimento di spessore pari a $0,80\text{ m}$ a partire dall'estradosso della chiave di volta, contenuto lateralmente dai timpani realizzati in muratura di mattoni con tessitura a testa. La volta in mattoni, realizzata con *apparecchiatura elicoidale all'inglese*, ha uno spessore di circa $0,80\text{ m}$, ed avendo un profilo ellittico risulta essere ribassata con un freccia pari a 2.70 m . La larghezza complessiva in direzione ortogonale all'asse stradale è di 7.60 m mentre le pile-spalle, aventi pianta trapezoidale, sono larghe 3 m , spesse 8.80 m e alte 3.80 m .

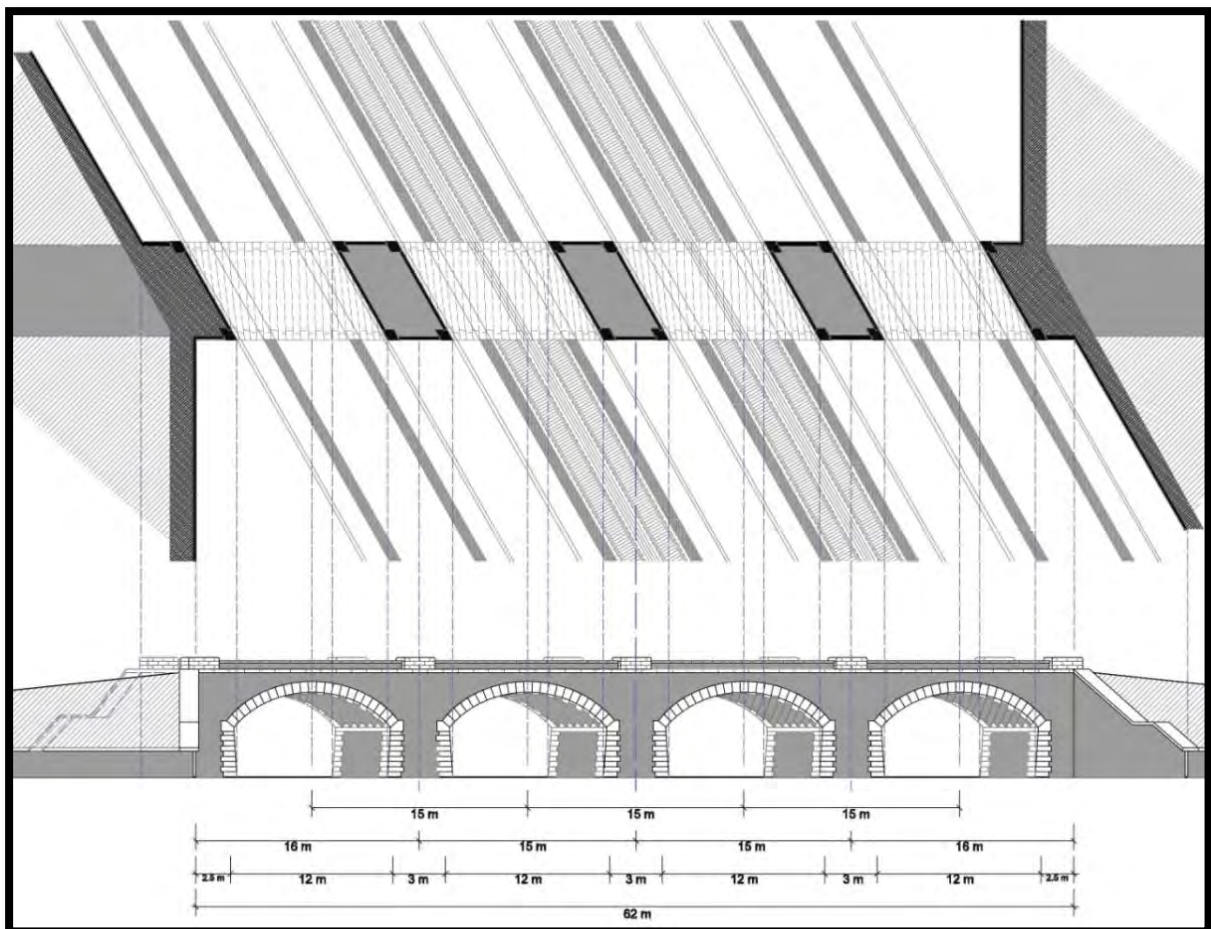


Fig. 8.44. *Pianta e Prospetto (Scala 1:500).*

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE	
Luce campata (L)	12.30 m
Spessore in chiave dell'arco (S)	0.80 m
Freccia dell'arco (f)	2.70 m
Profondità del ponte (P)	7.60 m
Altezza della pila (H)	3.80 m
Larghezza della pila (B)	3.00 m

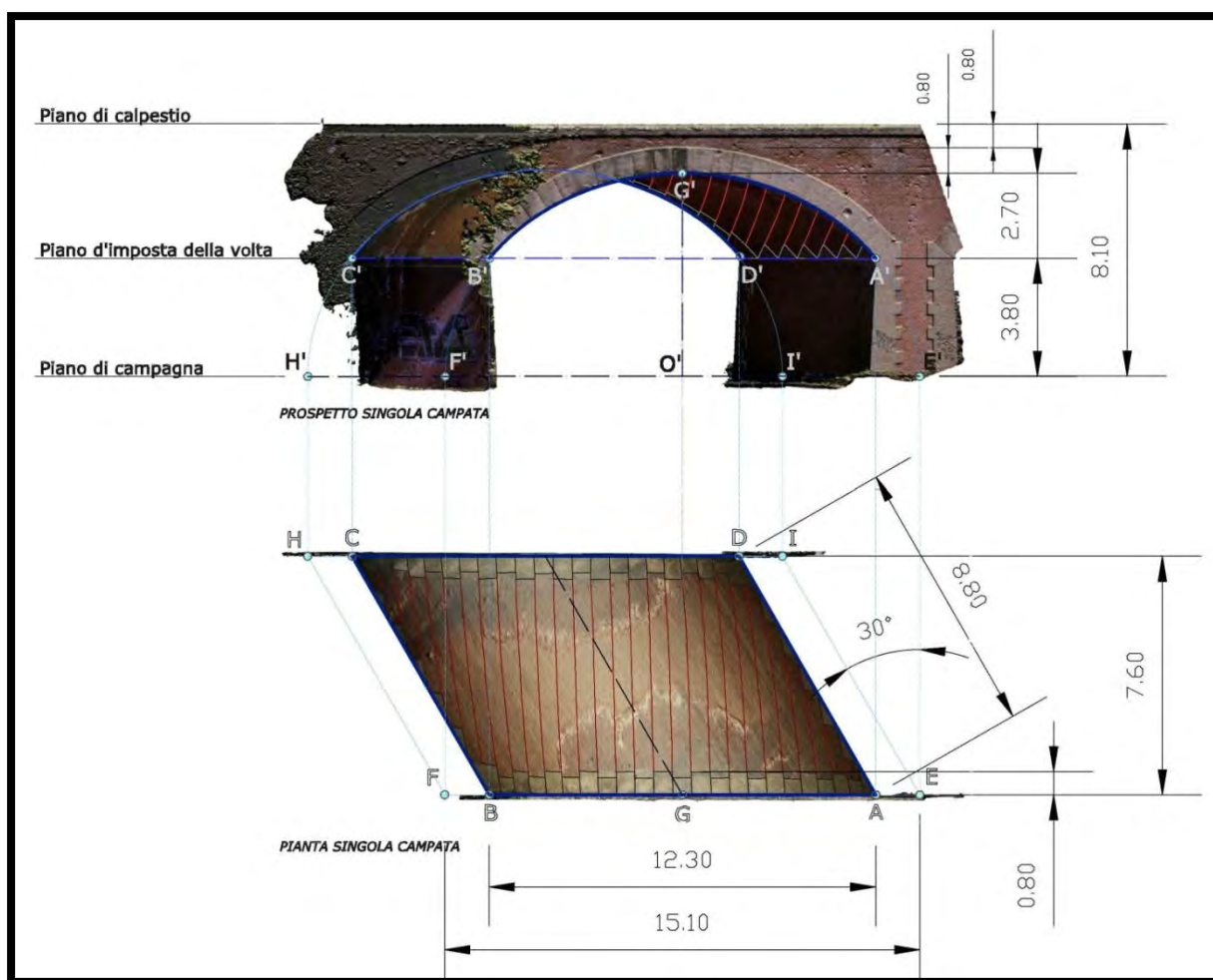


Fig. 8.45. Pianta e Prospetto quotati della singola campata. (Scala 1.:200).

8.7.5. Livello di conoscenza

Le caratteristiche geometriche del ponte sono state rilevate attraverso il metodo della *fotomodellazione architettonica* (approfondito nell'ambito della tesi di laurea), attraverso un complesso rilievo fotografico e la registrazione di alcune misure si è ricostruito un modello tridimensionale del ponte geometricamente fedele all'originale. Non si sono svolte campagne di indagini con prove sperimentali per la caratterizzazione dei materiali, ma dalle specifiche campagne di censimento svolte per questi tipi di ponti e dalle indicazioni in normativa, si sono potuti prendere in esame parametri meccanici affidabili. In base alle informazioni disponibili, il livello di conoscenza che determina il metodo di analisi e i fattori di confidenza da applicare alle proprietà dei materiali è stato assunto **LC1** ($FC = 1.35$).

I parametri meccanici caratteristici della muratura in mattoni pieni sono stati ricavati dalla tab. C8A.2.1 della Circolare applicativa in conformità al livello di conoscenza assunto:

CARATTERISTICHE MECCANICHE	
<i>Tipo Muratura</i>	Muratura in mattoni pieni e malta di calce
<i>Resistenza a Compressione</i> (f_m)	240 N/cm^2
<i>Resistenza a Taglio</i> (τ_0)	6.0 N/cm^2
<i>Modulo Elastico</i> (E)	1200 N/mm^2
<i>Peso specifico</i> (w)	18 kN/m^3

8.7.6. Azione sismica e Spettri di Risposta sismica

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa (a_g) in condizioni di campo libero sul sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale, nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente ($S_e(T)$), con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza (P_{VR}).

Per la vigente normativa, le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

- a_g : accelerazione orizzontale massima al sito;
- F_0 : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_C^* : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

L'opera si pone nella frazione del comune di Poiana di Granfion, Grisignano di Zocco (VI), con coordinate 11,669 e 45,476. Il tipo di costruzione (ponte) ha richiesto l'adozione di una vita nominale maggiore di cento anni (*tipo di costruzione 3*, NTC08, 2.4.1), mentre la classe d'uso scelta è la *classe*

III, in conformità con le prescrizioni in normativa che riguardano ponti e reti ferroviarie il cui crollo provocherebbe situazioni di emergenza (NTC08, 2.4.2), i seguenti valori hanno condotto a una valutazione della vulnerabilità sismica del sito per un periodo di riferimento di 150 anni.

In seguito si riportano i dati di *input* e *output* per la valutazione dell'azione sismica prevista nel sito:

<i>Parametri per il calcolo del PERIODO DI RIFERIMENTO [V_R]</i>		
V_N	> 100 anni	
C_U	1.5	
$V_R = V_N * C_U$	150 anni	
<i>Parametri per il calcolo degli SPETTRI DI RISPOSTA</i>		
	<i>SLD</i>	<i>SLV</i>
a_g	0.060 g	0.148 g
F_0	2.569	2.485
T_C^*	0.278 s	0.309 s

L'analisi del sottosuolo ha prodotto i seguenti risultati:

- categoria del sottosuolo: **B**
- categoria topografica: **T1**

I valori dei parametri utili per il calcolo degli spettri risultano:

	S_S	C_C	S_T
<i>SLD</i>	1.20	1.421	1.00
<i>SLV</i>	1.20	1.391	1.00

	S	η	T_B	T_C	T_D
<i>SLD</i>	1.20	0.417	0.132 s	0.395 s	1.839 s
<i>SLV</i>	1.20	0.333	0.143 s	0.430 s	2.194 s

I grafici degli spettri di risposta sismica:

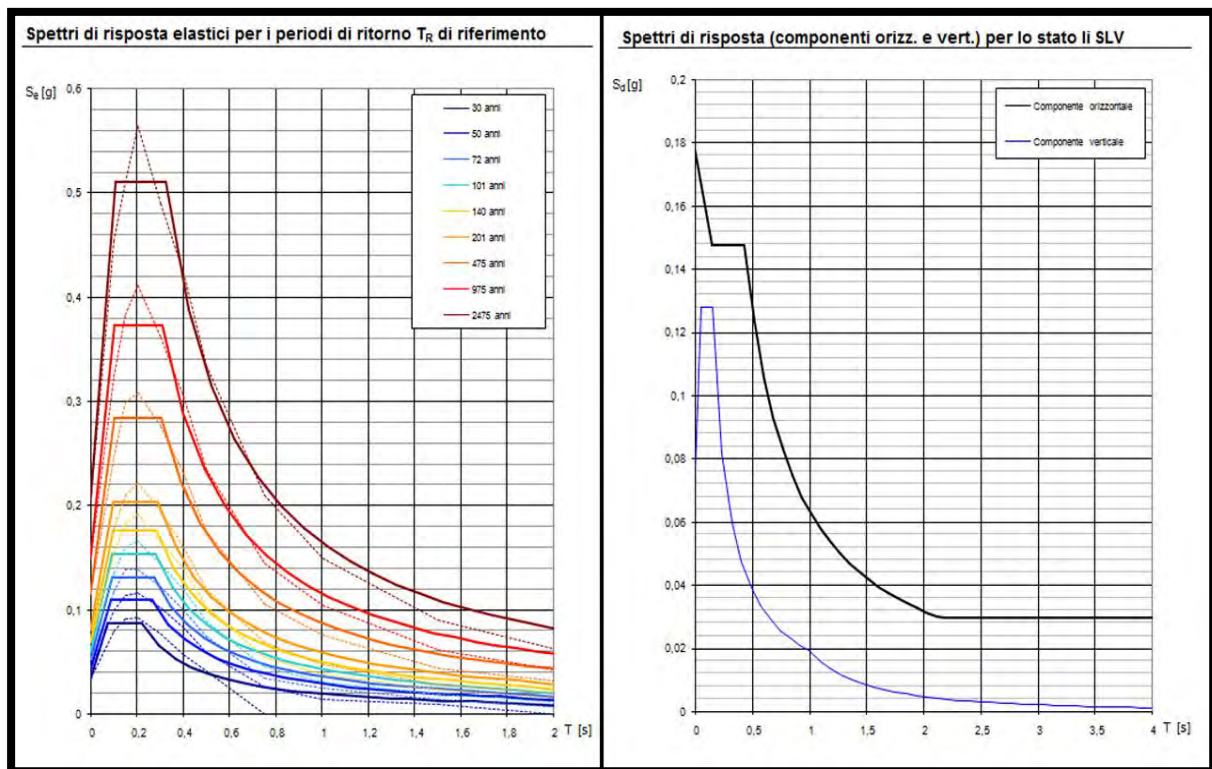


Fig. 8.46 Spettro in accelerazione $S_e(T)$ a sinistra, Spettro in spostamento $S_D(T)$ a destra.

Le accelerazioni al suolo corrispondente alla zona sismica dove è situato il ponte ricavate dallo spettro di risposta elastico, per gli stati limite considerati, sono ricavati come da normativa attraverso la relazione:

$$PGA_{SOL} = a_g(P_{VR}) * S$$

SLD	$PGA_{SOL} = 0.072 g$
SLV	$PGA_{SOL} = 0.177 g$

8.7.7. Analisi della risposta sismica della struttura

L'obiettivo minimo da perseguire è costituito dalla determinazione dell'accelerazione al suolo che innesca il meccanismo locale più vulnerabile del ponte; in secondo luogo viene valutato lo spostamento ultimo del punto di controllo della struttura. Si utilizza l'analisi cinematica non lineare per la determinazione della curva di capacità rappresentativa della risposta strutturale.

La verifica allo stato limite di danno (SLD) viene effettuata controllando che l'accelerazione al suolo che innesca il cinemismo (PGA_{RES}) sia superiore al picco di accelerazione al suolo corrispondente alla zona sismica in cui è situato il ponte (PGA_{SOL}).

La verifica allo stato limite ultimo (SLV), può essere condotta alternativamente:

- in modo semplificato e lineare
- mediante spettro di capacità non lineare

Un'analisi preliminare mette in luce, compatibilmente con la tipologia del ponte oggetto di verifica (*ponte ad arco multicampata con pile tozze*), che la vulnerabilità dell'opera risulta essere condizionata solamente dalla capacità strutturale dell'arco singolo.

8.7.8. Valutazione della vulnerabilità dell'arco

I ponti ad arco in muratura sono dotati di elevata rigidezza: infatti, l'arco non subisce spostamenti relativi nel piano rispetto al suolo, finché il valore dell'accelerazione esterna non è tale da trasformare la struttura in un meccanismo, costituito da tronchi rigidi connessi tra loro da cerniere. Pertanto, il parametro decisivo che determina la risposta strutturale è il picco di accelerazione al suolo

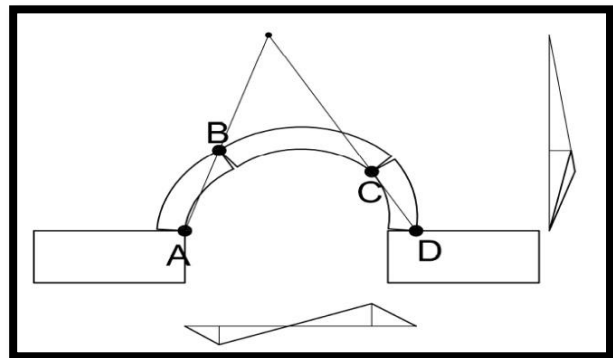


Fig. 8.47. Meccanismo di collasso dell'arco.

atteso per il sito. Il ponte studiato ha pile tozze pertanto il meccanismo di collasso che verrà valutato è quello del arco monocampata dove le imposte massive si possono considerare come vincoli rigidi. L'elemento maggiormente vulnerabile all'azione sismica longitudinale risulta essere l'arco, che può sviluppare un meccanismo di collasso antisimmetrico attraverso la formazione di quattro cerniere⁷⁹.

Le posizioni delle cerniere plastiche sono state ricercate mediante creazione di un modello strutturale ad elementi finiti (FEM) e un'analisi non lineare in cui vengono applicati i carichi in maniera crescente monotona (*Analisi Push-Over*). Trattandosi di un'analisi sismica che coinvolge esclusivamente il comportamento longitudinale, il modello piano risulta essere sufficiente; inoltre si sono sfruttati legami non lineari per rappresentare in modo più realistico possibile il materiale muratura. Questo aspetto risulta essere di importanza cruciale, poiché la resistenza di questi manufatti in muratura non potrebbe mai garantire un funzionamento in campo elastico su sollecitazione sismica e quindi nella realtà il materiale entra sempre e comunque in un ramo di comportamento anelastico, che per essere studiato, essendo dipendente alla storia del carico, ha bisogno di un modello che riesca ad essere quanto più aderente possibile al comportamento non lineare del materiale.

La muratura e il riempimento sono stati modellati, tramite elementi *plate*, come un continuo equivalente, ossia un mezzo omogeneo in cui i singoli elementi costituenti (per esempio, per la

⁷⁹ VEDI Appendice 4.3

muratura, i mattoni e i giunti di malta) non sono rappresentati distintamente, interessandoci solamente un comportamento complessivo, effettuando cioè una *macromodellazione*. In questa fase non era il nostro fine andare ad indagare lo stato tensionale locale, quanto cogliere la reazione globale dell'arco, e definirne la curva di capacità con conseguente riserva plastica. Inoltre, per le condizioni al contorno, il portale è stato considerato come incastrato alla base con vincoli rigidi.

Si riporta di seguito in una tabella lo schema con le caratteristiche dei materiali assegnate ai *plate*:

CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI MATERIALI		
<i>Muratura</i>	ρ : Peso specifico (kg/m^3)	1800
	E: Modulo elastico (MPa)	5000
	ν : Coefficiente di Poisson	0.24
<i>Riempimento</i>	ρ : Peso specifico (kg/m^3)	1800
	E: Modulo elastico (MPa)	500
	ν : Coefficiente di Poisson	0.24

Per l'analisi compiuta, si è scelto un incremento di accelerazione orizzontale di progetto pari a $0,005 \text{ m/s}^2$ per un totale di 50 incrementi. Il nodo di controllo considerato nell'ambito dell'analisi è stato individuato in chiave dell'arcata del ponte, in quanto, anche osservando la deformata, può essere considerato come il più esposto al raggiungimento della deformazione a rottura.

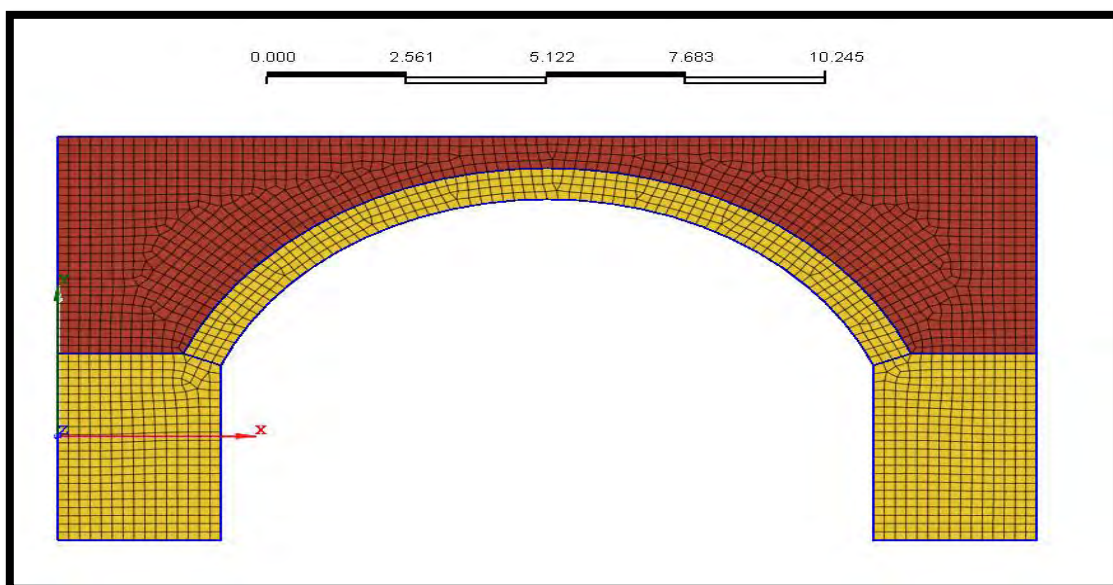


Fig. 8.48. Mesh della singola campata (comportamento arco singolo).

Di seguito è riportata la deformata a collasso, con rappresentazione cromatica degli spostamenti in direzione del sisma dove risulta evidente lo sbilanciamento dell'arco e le aree interessate dalla

plasticizzazione. In corrispondenza delle cerniere si ha un incremento delle tensioni di compressione all'interno di una piccola porzione dello spessore dell'arco, mentre nella restante parte le tensioni di trazione provocano la fessurazione in mancanza di resistenza del materiale.

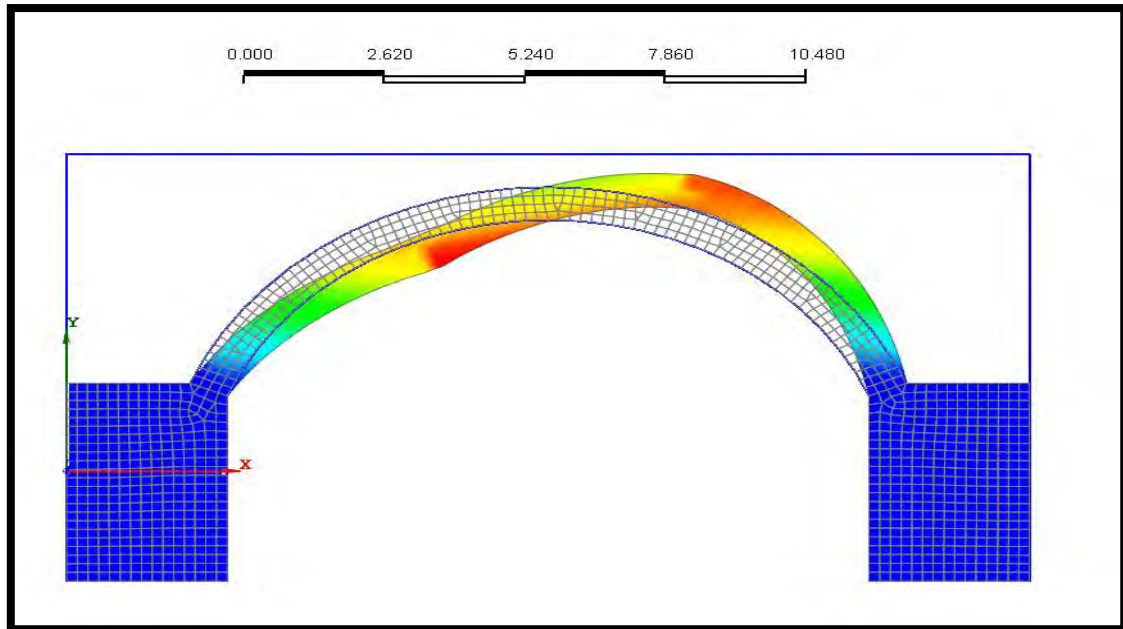


Fig. 8.49. Diagramma degli spostamenti.

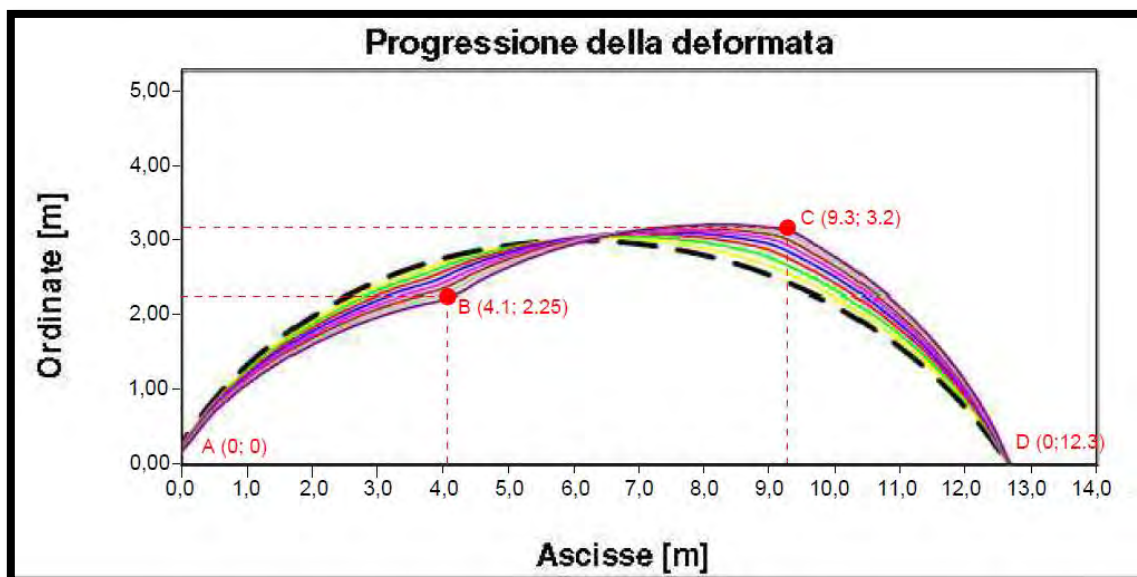


Fig. 8.50. Diagramma della deformata e posizione delle cerniere plastiche.

L'implementazione del foglio di calcolo con le coordinate delle cerniere plastiche ottenute dall'analisi *push-over*, insieme alle caratteristiche geometriche, le proprietà dei materiali e la combinazione di carico per verifiche orizzontali, restituisce un coefficiente d'innescò del meccanismo α_0 pari a :

$$\alpha_0 = 0.465$$

Di seguito un riepilogo dei dati necessari per le verifiche:

PARAMETRI PER LE VERIFICHE	
Coefficiente d'innescio del meccanismo	$\alpha_0 = 0.465$
Accelerazione spettrale d'innescio del meccanismo	$a_0^* = 0.472 \text{ g}$
Spostamento spettrale dell'oscillatore equivalente	$d^* = 0.038 \text{ m}$

8.7.9. Verifica allo Stato Limite di Danno (SLD)

La verifica SLD si ritiene soddisfatta (Circolare esplicativa, C8A4.2.3), se l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo a_0^* è superiore all'accelerazione dello spettro elastico, valutato per un periodo ($T=0$), opportunamente amplificato.

Per l'opera in analisi si sono ricavati i seguenti risultati:

$$PGA_{SOL} = \mathbf{0.072 \text{ g}} \quad \text{domanda (D)}$$

$$PGA_{RES} = \mathbf{0.472 \text{ g}} \quad \text{risposta (C)}$$

Il rapporto di capacità tra la domanda e la risposta alle sollecitazioni sismiche dimostra come la verifica SLE sia abbondantemente soddisfatta, fatto atteso visto che il ponte è tutt'oggi in esercizio:

$$C/D = 6.55 \rightarrow 655\% \rightarrow \mathbf{OK!}$$

8.7.10. Verifica Lineare allo Stato Limite di Ultimo (SLV)

La verifica SLV si ritiene soddisfatta (Circolare NTC C8A4.2.3), se l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo a_0^* (PGA_{RES}) è superiore all'accelerazione dello spettro elastico, ridotto di un fattore di struttura q assunto a favore di sicurezza pari a ($q=2$).

$$a_0^* \geq \frac{a_g(P_{VR}) * S}{q} = 0.106 \text{ g}$$

$$PGA_{SOL} = \mathbf{0.106 \text{ g}} \quad \text{domanda (D)}$$

$$PGA_{RES} = \mathbf{0.472 \text{ g}} \quad \text{risposta (C)}$$

Il rapporto di capacità tra la domanda e la risposta alle sollecitazioni sismiche dimostra come anche la verifica SLU lineare sia abbondantemente soddisfatta:

$$C/D = 4.45 \rightarrow 445\% \rightarrow \mathbf{OK!}$$

8.7.11. Verifica NON Lineare allo Stato Limite di Ultimo (SLV)

La verifica cinematica NON lineare prevede il confronto tra la capacità di spostamento spettrale dell'oscillatore equivalente d_u^* e la domanda di spostamento Δ_d , definita dalla normativa per mezzo di uno spettro di spostamento e valutata in corrispondenza di un periodo secante T_S , calcolato per uno spostamento pari a:

$$d_s^* = 0.4d_u^* \quad \text{con} \quad T_S = 2\pi \sqrt{d_s^*/a_s^*}$$

L'accelerazione a_s^* corrisponde all'accelerazione sulla curva di capacità dell'oscillatore equivalente, in corrispondenza dello spostamento d_s^* . Lo spostamento d_u^* è assunto pari al 40% dello spostamento per cui si annulla il moltiplicatore α .

La curva di capacità ottenuta per il suddetto cinematismo è rappresentata nel grafico:

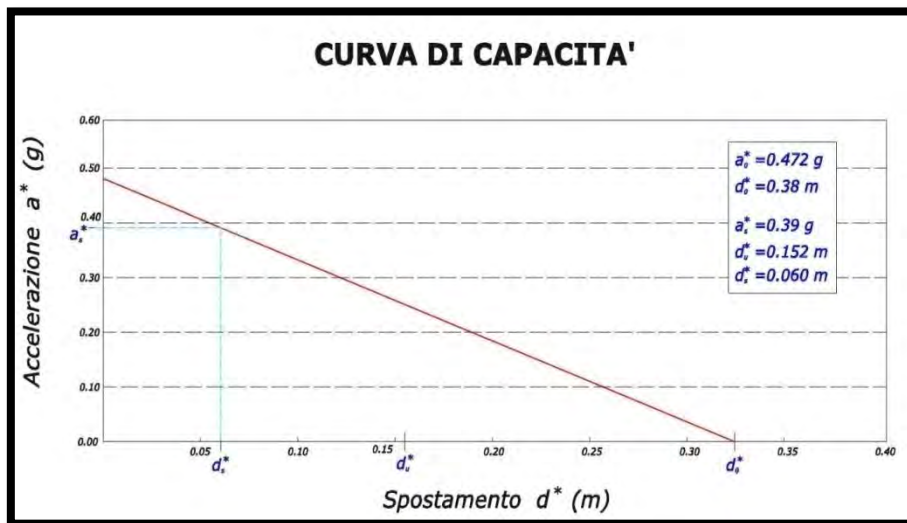


Fig. 8.51. Curva di capacità.

I risultati della verifica sono i seguenti:

$$\Delta_d = S_D(T_S) = \mathbf{0.0106\ m} \quad \text{domanda (D)} \quad \text{con} \quad \{T_D \leq T_S \leq T_E ; T_E = 5 \text{ (suolo B)}\}$$

$$d_u^* = \mathbf{0.0152\ m} \quad \text{risposta (C)}$$

Il rapporto di capacità tra la domanda e la risposta alle sollecitazioni sismiche dimostra come anche la verifica SLU NON lineare sia soddisfatta:

$$C/D = 1.43 \rightarrow 143\% \rightarrow \text{OK!}$$

9. CONCLUSIONI

Le riflessioni sulla forma architettonica basata sull'uso della stereotomia ha segnato storicamente un picco tra i secoli XVI e XVIII con una brusca interruzione agli inizi del XIX secolo. Sin dalla metà del XVIII secolo, a seguito di un mutato clima culturale e tecnologico, hanno cominciato ad essere evidenti tracce di crisi nei riguardi della stereotomia classica, colpevole di produrre apparati formali ridondanti e non rispondenti alle necessità del tempo. Inoltre, a partire dal 1789, anno della Rivoluzione Francese, si dà inizio alla distruzione di tutti i più celebri archetipi della costruzione stereotomica, considerati espressione dei fasti del regime monarchico.

È interessante assistere però, negli stessi anni, ad una mutata funzione della stereotomia, ovvero alla sua trasformazione da *scienza tettonica* in materia scolastica pura avvenuta con la creazione dell'*Ecole du Genie de Mézières*, una delle prime scuole militari d'ingegneria d'Europa⁸⁰.

Dai primi anni del XIX secolo *l'Ecole des Beaux Arts* e *l'Ecole Polytechnique*, rispettivamente rappresentative dei cicli universitari di Architettura e di Ingegneria⁸¹, seppur strutturate con distinti programmi didattici condividono l'insegnamento della Stereotomia, considerata come la materia più efficace per favorire gli studenti nello sviluppo della capacità di immaginare e "costruire lo spazio". Purtroppo lo studio della stereotomia oggi è stato escluso sia dalla pratica costruttiva che dagli insegnamenti didattici, risultando solo come l'oggetto di parziali e isolate ricerche nell'ambito della storia del costruito. Il rinnovato interesse per questa disciplina, apparentemente così lontana dalle procedure contemporanee di progettazione e costruzione dell'architettura, consiste nell'ampio ventaglio di possibilità progettuali che essa offre ricorrendo ai materiali "antichi" dell'architettura quali la pietra e il legno. L'importanza nel riutilizzo di questi materiali sta nella loro sostenibilità: la *BioEdilizia*⁸², trend attualmente in forte crescita, impiega materiali che spesso derivano dalle materie prime tradizionali normalmente presenti natura e che sono progressivamente scomparsi dal

⁸⁰La Scuola Reale di Ingegneria Militare fondata nel 1748 su suggerimento del conte d'Argenson, Segretario di Stato per la Guerra e Nicolas de Chatillon, comandante della cittadella di Charleville-Mézières, comune francese situato nel dipartimento delle Ardenne, nella regione Champagne-Ardenne.

⁸¹ Scuole storiche francesi fondate entrambe in epoca napoleonica, 1811 per *l'Ecole des Beaux Arts* e 1794 per *l'Ecole Polytechnique*, a Parigi, per volere dello stesso Napoleone, attualmente sedi principali dello Statuto Universitario Francese.

⁸²Bioedilizia o *GreenBuilding* è una nuova filosofia costruttiva a basso impatto ambientale orientata al miglioramento della salute e della qualità della vita attraverso una corretta e consapevole scelta dei materiali di costruzione che devono essere eco-compatibili, naturalmente traspiranti e ad elevata efficienza energetica.

mercato per via dell'avvento della produzione industriale. Oggi questi prodotti vengono ri-presentati con migliori standard di qualità e performance, con una significativa riduzione degli impatti negativi sull'ambiente e con un processo di produzione molto più efficiente, valutando l'intero ciclo di vita del materiale, dalla sua produzione fino al suo smaltimento.

Inoltre, se negli ultimi secoli l'ingegnere ha concepito e sviluppato i suoi progetti usando essenzialmente i metodi di rappresentazione sul piano, oggi, con gli strumenti computazionali dell'*infografica* è possibile controllare e modificare il modello tridimensionale con metodi molto simili alla costruzione reale; quindi il progettista può in questo modo operare costruendo direttamente l'architettura nello spazio, anche se in ambiente digitale. La Stereotomia, ed in particolare la tecnica del *trait*, ha un'impostazione molto simile, non limitandosi a conoscere e a descrivere l'oggetto, ma letteralmente costruendolo in ogni sua parte, concio per concio: non solo trattiene in sé il modello complessivo e completo dell'oggetto ma consente anche di descriverlo e persino di costruirne direttamente un modello fisico, per quanto complicato esso sia. Questo fondamentale aspetto fa della scienza stereotomica uno strumento ancora vivo e dinamico che può risultare molto utile all'ingegnere-architetto.

Con il presente studio si cerca fundamentalmente di ripercorrere le ricerche sulla costruzione in pietra da taglio riprendendo in considerazione le nozioni ottocentesche alla base della cultura stereotomica alla ricerca di una spinta creativa, in essa congenita, alla progettazione architettonica contemporanea. Una *nuova* sperimentazione che cerca di coniugare il carattere *sincretico* della modellazione *infografica* tridimensionale all'analisi morfologica dell'architettura specificamente stereotomica⁸³, con l'ausilio delle nuove tecnologie digitali tanto per il reperimento dei dati metrici quanto per la rielaborazione delle forme.

⁸³ FALLACARA, G., *Verso una progettazione stereotomica*, ARACNEeditrice, Roma 2007, p 150.

10. BIBLIOGRAFIA

- ❖ ADHÉMAR, J. A., *Cours de mathématiques à l'usage de l'ingénieur civil*, Bachelier, Paris 1832-56.
- ❖ ADHÉMAR, J.A., *Nouvelles Etudes de coupe des pierres, Traite pratique théorique des Ponts biais*, Dalmont, Paris 1856.
- ❖ ALBANESI, C, "*Dispensa su Analisi Statica Non Lineare (Pushover)*" Dipartimento di Strutture, Università degli Studi Roma Tre, Roma 2007.
- ❖ APRILE, A., PELÁ, L., BENEDETTI, A., "*Vulnerabilità sismica di ponti ad arco in muratura di pietrame*" XVI Convegno Italiano di Meccanica Computazionale, Bologna 2006.
- ❖ BAGGI, V., *Ingegneria per Costruzioni Stradali-Ferrovie*, Torino 1926.
- ❖ BASHFORT, F., *A practical treatise on the construction of oblique bridges, with spiral and with equilibrated courses*, G. Bell, London 1850.
- ❖ BERTO, L., SCOTTA, R., SAETTA, A., VITALIANI, R., "*Failure mechanism of masonry prism loaded in axial compression: computational aspects*", Department of Construction and Transportation, Padua University 2006.
- ❖ BORDONI, A., *Nota di stereotomia sopra i cunei dei ponti in isbieco*, Giusti, Milano 1826.
- ❖ BUCK, G.W., "*Popular and practical treatise on massonery and stone-cutting*", in *Practical and theoretical essay on oblique bridges*, Weale, London 1839.
- ❖ CANTALUPI, A., *La costruzione dei ponti e dei viadotti: trattato di architettura pratica*, Vallardi, Milano 1884.
- ❖ CARAMUEL, L. J., *Arquitectura civil, recta y oblicua*, Vigevano 1687.
- ❖ CARBONE, I., DEFELICE, G., "*Fragilità di ponti ad arco in muratura sotto azioni sismiche longitudinali*". XII Convegno ANIDIS, Pisa 2006.
- ❖ CLEMENTE, P., "*Introduction to dynamics of stone arches*". Earthquake Eng. and Structural Dynamics, Milano 1998.
- ❖ COLOMBANI, F., *Sul taglio dei cunei dei ponti in sbieco*, Giusti, Milano 1838.
- ❖ CURABELLE, J., *Examen des oeuvres du Sieur Desargues*, Blanchard, Paris 1644.
- ❖ DA PORTO, F., FRANCHETTI, P., GRENDENE, M., RANZATO, L., VALLUZZI, M., MODENA, "*Structural capacity of masonry arch bridges to horizontal loads*". 5th Int. Conf. on Arch Bridges ARCH'07. Madeira (POR.) 1998.

- ❖ DE L'ORME, P., *Nouvelles Inventions pour bien bastir et à petits fraiz*, Paris 1561.
- ❖ DE LUCA, L., *La fotomodellazione architettonica. Rilevo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2011.
- ❖ DEVEBEC, P., MALIK, J., *Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A hybrid Geometry of Image-Based-Approach*, Proceedings of SIGGRAPH, USA California 1996.
- ❖ FALLACARA, G., *Verso una progettazione stereotomica*, ARACNEeditrice, Roma 2007.
- ❖ FALLAVOLITA, F., *Le superfici rigate e le superfici sviluppabili*, Università di Roma La Sapienza, Roma 2008.
- ❖ FRAMPTON, K., *Tettonica e architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, Skira, Milano 2005.
- ❖ FRÉZIER, A.F., *La théorie et la pratique de la coupe des pierres et des bois*, P. A. Jombert, Paris 1737–39, I vol.
- ❖ FRÉZIER, A.F., *Eléments de stéréotomie à l'usage de l'architecture pour la coupe des pierres*, Jombert, Paris 1760.
- ❖ GINES DE ARANDA, M., *Cerramientos y trazas de montéas*, Madrid 1690. (Madrid, *Biblioteca del Museo de Ingenieros del Servicio Históricos Militar*).
- ❖ GIORDANO, A., *Cupole Volte e altre Superfici: La genesi e La forma*, Utet, Torino 1999.
- ❖ HACHETTE, J.P.N., *Description d'un nouveau procédé pour construire les voûtes biaises*, in *"Annales des Ponts et Chaussées"*, I sem., 1854.
- ❖ HEYMAN, J., *"The Masonry Arch"*, Hellis Horwood Ltd., Chichester, West Sussex (England) 1982.
- ❖ LA GOURNERIE, J. de, *Considérations géométriques sur les arches biaises*, in *"Annales des Ponts et Chaussées"*, II sem., 1851.
- ❖ LA HIRE, P. de, *Traité de la coupe des pierres*, Paris 1687. (Paris, *Bibliothèque de l'Institut*).
- ❖ LA RUË, J. B. de, *Traité de la coupe des pierres*, P. A. Martin, Paris 1728.
- ❖ LÉVY, M., *Note sur un système particulier de ponts biais*, in *"Annales des Ponts et Chaussées"*, IV trim., 1897.
- ❖ OLIVEIRA, M.M., *Image-Based Modeling and Rendering*, RITAed, California (USA) 2002.
- ❖ MONGE, G., *Application de l'algèbre à la géométrie*, Paris 1795.
- ❖ PAPARELLA, R., VERGINE, F., *Il sistema edilizio*, ARACNEeditori, Roma 2007.
- ❖ PEROUSE DE MONTCLOS, J.M., *L'architecture à la française, XVIème, XVIIème, XVIIIème siècles*, Picard, Paris 1872, p. 85.
- ❖ SAINT AUBIN, J. P., *Le revelé et la représentation de l'architecture*, Inventair Général E.L.P., Parigi 1992.

- ❖ SEMPER, G., *Die vier Elemente der Baukunst*, Vieweg, Brunswich 1851.
- ❖ TREVISAN, C., *Per la storia della stereotomia. Geometrie, metodi e costruzioni*, Gangemi, Roma 1998.
- ❖ VANDELVIRA, A., *El Tratado de Arquitectura*, Madrid 1591. (Madrid, *Biblioteca de la Escuela de Arquitectura*).